

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На правах рукопису

СЕМЕНОВА ІННА ГЕОРГІЇВНА

УДК 551.577.38

**СИНОПТИЧНІ ТА КЛІМАТИЧНІ УМОВИ ФОРМУВАННЯ  
ПОСУШЛИВИХ ЯВИЩ В УКРАЇНІ**

11.00.09 – метеорологія, кліматологія, агрометеорологія

Дисертація на здобуття наукового ступеня  
доктора географічних наук

Науковий консультант  
Польовий Анатолій  
Миколайович,  
доктор географічних наук,  
професор

Одеса – 2015

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	5
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА МЕТОДИ ОЦІНКИ ПОСУШЛИВИХ ЯВИЩ .....	12
1.1. Основні поняття та визначення, розповсюдження посушливих явищ .....	12
1.2. Кількісні показники посух .....	20
1.3. Характеристика бездощових періодів в Україні.....	38
1.3.1. Умови виникнення та розповсюдження бездощових періодів .....	38
1.3.2. Повторюваність бездощових періодів у поточних кліматичних умовах .....	40
РОЗДІЛ 2. КЛІМАТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОСУХ В УКРАЇНІ НАПРИКІНЦІ ХХ – ПОЧАТКУ ХХІ СТОЛІТТЯ .....	45
2.1. Оцінка просторово-часового розподілу посух за допомогою гідротермічного коефіцієнту .....	45
2.1.1. Аналіз полів гідротермічного коефіцієнту .....	45
2.1.2. Аналіз просторово-часового розподілу гідротермічного коефіцієнту .....	63
2.2. Оцінка посух за індексом посушливості Д.А. Педя .....	68
2.3. Аналіз режиму посух за індексом Палмера .....	73
2.4. Аналіз розподілу посух за допомогою стандартизованих індексів опадів та опадів-евапотранспірації .....	83
2.5. Каталог сезонних посух в Україні за період 1995-2012 рр. ....	90
РОЗДІЛ 3. ПОВТОРЮВАНІСТЬ ПОСУХ В УКРАЇНІ У МАЙБУТНІХ КЛІМАТИЧНИХ УМОВАХ .....	103
3.1. Принципи та досягнення сучасного кліматичного моделювання...	103
3.2. Аналіз температурного режиму та режиму опадів у теплий сезон періоду 2020-2050 рр. ....	111

3.3. Просторово-часовий розподіл посух у 2020-2050 рр. ....	116
3.3.1. Сезонні посухи .....	117
3.3.2. Весняно-літні посухи .....	120
3.3.3. Літні посухи .....	123
3.3.4. Літньо-осінні посухи .....	126
3.3.5. Часовий хід посух протягом 2020-2050 рр. ....	130
<b>РОЗДІЛ 4. ЦИРКУЛЯЦІЙНІ УМОВИ ФОРМУВАННЯ</b>	
<b>ПОСУШЛИВИХ ЯВИЩ .....</b>	<b>135</b>
4.1. Особливості великомасштабної циркуляції в посушливі періоди .	135
4.1.1. Загальні відомості про стан атмосферної циркуляції .....	135
4.1.2. Циклічні коливання атмосфери і динаміка посух та урожайності .....	140
4.2. Зв'язок посух в Україні з блокуючими процесами в атмосфері .....	148
4.2.1. Поняття та визначення атмосферного блокування .....	148
4.2.2. Просторова структура блокування при посухах в Україні ..	153
4.2.3. Стан зонального потоку під час блокування .....	162
4.3. Атмосферна циркуляція і значущі посухи в Україні у сучасний період .....	166
4.3.1. Структура висотного поля тиску в періоди посух .....	166
4.3.2. Повторюваність циклонічних процесів в зимовий період 1994-2012 рр. ....	170
4.3.3. Синоптичні процеси в періоди посух .....	175
4.4. Енергетичний стан атмосфери під час посух .....	187
<b>РОЗДІЛ 5. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ</b>	
<b>СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР В УМОВАХ</b>	
<b>ВПЛИВУ ПОСУХ .....</b>	<b>206</b>
5.1. Використання вегетаційного індексу NDVI для моніторингу посух в Україні .....	206
5.2. Особливості використання вегетаційного індексу NDWI .....	218

5.3. Моделювання урожайності зернових культур з використанням супутникових вегетаційних індексів .....	223
5.3.1. Огляд методик моделювання .....	223
5.3.2. Методика побудови емпіричних моделей урожайності озимої пшениці та ярого ячменя в Україні .....	231
5.3.3. Моделювання урожайності озимої пшениці .....	235
5.3.4. Моделювання урожайності ярого ячменя .....	245
ВИСНОВКИ .....	255
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	261
Додаток А. Аналіз бездощових періодів в Україні у квітні-жовтні 1995-2012 рр. ....	279
Додаток Б. Приклади полів ГТК, що відносяться до другого класу, у вересні .....	281
Додаток В. Схема розташування розрахункових областей .....	282
Додаток Г. Статистичні характеристики індексів посушливості по агрокліматичним зонам України за період 1995-2012 рр. ....	283
Додаток Д. Характеристики коливань індексу блокування ЕСВІ .....	286
Додаток Е. Критерії аналогічності $\rho$ , $\eta$ та індекси посушливості SPI1, ГТК для випадків посух в Україні в період 1995-2012 рр. ....	287
Додаток Ж. Характеристики циклонічної та антициклонічної циркуляції над Україною .....	288
Додаток К. Математичні вирази для визначення перетворень форм енергії .....	290
Додаток Л. Графіки часового ходу енергетичних характеристик атмосфери та індексу блокування ЕСВІ за квітень-червень 1959 р. ....	291
Додаток М. Графіки часового ходу енергетичних характеристик атмосфери та індексу блокування ЕСВІ за квітень-червень 1968 р. ....	293
Додаток Н. Графіки часового ходу енергетичних характеристик атмосфери та індексу блокування ЕСВІ за вересень-листопад 2011 р. ....	295

## ВСТУП

### **Актуальність теми.**

Україна є одним з основних землеробських районів Східної Європи завдяки сприятливому поєднанню помірному клімату і родючих ґрунтів. Проте ця територія досить часто перебуває під впливом великомасштабних циркуляційних систем, що призводить до виникнення тривалих періодів з дефіцитом опадів, наслідком яких є формування посушливих явищ, як то посухи та суховії.

Проблема моніторингу і прогнозування посушливих явищ залишається незмінно актуальною як у наукових дослідженнях, так і при вирішенні прикладних завдань. Згідно оцінкам ООН, економічні збитки, які завдають посухи, перевищують 20% загальних втрат, які належать всім стихійним явищам загалом. Сучасний кліматичний період в глобальному сенсі є неоднозначним через визначене за оцінками послаблення тренду підвищення температури, що породжує невизначеності в моделюванні як поточного, так й майбутнього кліматичного режиму. Проблема посилення посушливості багатьох аграрних регіонів Земної кулі під впливом кліматичних змін постає особливо гостро, адже на теперішній час на вирощування сільськогосподарських культур та тваринництво доводиться 70% всього обсягу води, який споживається основними секторами економіки. Передбачається, що до 2050 року світовий попит на продовольство збільшиться на 70%, при цьому споживання води сільським господарством зросте приблизно на 19%, а основні витрати придуться на регіони, які вже потерпають від нестачі води.

Посуха, як комплексне явище, пов'язане з вологістю ґрунту і виникає в результаті, перш за все, дисбалансу у кількості опадів, випаровуваності і стоку, тому складно піддається опису за допомогою будь-якого одного метеорологічного параметра. Разом з простими оцінками, пов'язаними із визначенням норми опадів або їх аномалій, широко застосовуються комплексні чисельні показники або індекси посух, здатні виявити як само

явище посухи, так і його інтенсивність та ступінь несприятливості наслідків. Оскільки єдиного показника ще не знайдено, проблема пошуку нових та оптимізації і пристосування для території України існуючих індексів є вельми актуальною. Включення показників посух до моделей урожайності сільськогосподарських культур здатне підвищити фізичне обґрунтування моделей і, загалом, якість прогнозування. Тому виникає необхідність удосконалення та розробки нових моделей короткострокового прогнозування урожайності з використанням новітніх індексів посух, які базуються як на наземних спостереженнях, так й даних супутникового зондування, та ще не мають широкого розповсюдження у вітчизняній гідрометеорології, але показали свою надійність в світовій практиці.

#### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Наукове дисертаційне дослідження виконано в рамках науково-дослідних робіт, що проводилися в Одеському державному екологічному університеті за наступними темами:

- «Моделювання аномальних атмосферних процесів в Україні» (№ ДР 0104U000291, 2004-2008 рр.);
- «Дослідження сучасного режиму циркуляції атмосфери і фронтальної діяльності над Європою» (№ ДР 0109U001368, 2008-2012 рр.);
- «Розробка теоретичної моделі формування катастрофічних водопіль на території України в умовах глобальних змін клімату» (№ ДР 0112U001125, 2012-2014 рр.);
- «Вразливість та адаптація галузей економіки України до змін клімату» (№ ДР 0113U000165, 2012-2014 рр.).

#### **Мета і задачі дослідження.**

*Мета дослідження* полягає у визначенні особливостей просторово-часового розподілу посушливих явищ в Україні у зв'язку з сучасними коливаннями регіональної циркуляції атмосфери та в короткостроковій майбутній перспективі, а також розробка методики прогнозування урожайності озимої пшениці і ярого ячменю з кількісним врахуванням

посушливого стану вегетаційного періоду на базі супутникової інформації.

Для досягнення поставленої мети розв'язані такі *задачі*:

- встановлення особливостей просторово-часового розподілу посушливих явищ по агрокліматичним зонам України за допомогою комплексної оцінки різних кількісних параметрів;

- визначення впливу коливань регіональної циркуляції атмосфери на процес формування посух на території України;

- оцінка мінливості кількісних показників посух у взаємозв'язку з коливаннями урожайності зернових культур в поточний кліматичний період;

- кількісна оцінка просторово-часового розподілу посух різної інтенсивності в Україні у вегетаційний період в короткостроковій перспективі до 2050 р.

- оцінка інформативності даних супутникового зондування Землі для визначення посух в Україні та їх пристосування до прогнозування урожайності зернових культур.

*Об'єкт дослідження* – посушливі явища на території України.

*Предмет дослідження* – просторово-часовий розподіл посух та їх вплив на продуктивність сільськогосподарських культур в змінних кліматичних умовах.

*Методи дослідження.* Дослідження виконано з застосуванням методів математичної статистики, статистичного і гідродинамічного моделювання, частотно-часового аналізу даних, кліматичного і синоптичного аналізу.

### **Наукова новизна одержаних результатів.**

Одержані в дисертаційному дослідженні результати дозволили розв'язати наукову проблему щодо визначення посухи як комплексного явища на основі теоретичного обґрунтування метеорологічних умов формування і принципів моніторингу посушливих явищ із застосуванням наземної та супутникової інформації, спрямованих на удосконалення методів прогнозування урожайності сільськогосподарських культур.

У дисертації вперше:

- встановлено закономірності просторово-часової мінливості п'яти індексів атмосферних посух і створено на їх базі каталог сезонних посух сучасного періоду по основним агрокліматичним зонам України;
- визначено найбільш ймовірні поля гідротермічного коефіцієнту і просторову повторюваність значень у поточних кліматичних умовах в Україні;
- визначено просторово-часовий розподіл посух за їх інтенсивністю у вегетаційний період на території України в майбутній перспективі до 2050 р. за даними глобального кліматичного моделювання в рамках репрезентативних траєкторій концентрацій;
- теоретично обґрунтована та реалізована методика оцінки стану блокування атмосфери з використанням уведеного Європейського континентального індексу блокування, та встановлено структурні особливості висотного поля тиску в періоди посух в Україні;
- встановлено кількісні зв'язки сумісного впливу посух та блокуючих атмосферних процесів на продуктивність озимої пшениці і ярого ячменя;
- теоретично обґрунтована та реалізована методика прогнозування урожайності зернових культур з використанням супутникової інформації і запропонованого індексу блокування.

У дисертації удосконалено:

- методику визначення закономірностей впливу еволюції блокуючих процесів на енергетичний стан атмосфери під час блокування.

У дисертації дістало подальшого розвитку:

- оцінка взаємозв'язку між фазами квазідворічного коливання зонального вітру в екваторіальній атмосфері та аномаліями урожайності зернових культур в Україні;
- визначення закономірностей просторово-часового розподілу посух на території України на початку XXI століття за допомогою супутникових вегетаційних індексів.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

Результати щодо просторово-часового розподілу посух на території



України доповнюють кліматичні відомості про розповсюдженість та інтенсивність цього явища в сучасний період, що може бути використано в глобальних кліматичних дослідженнях для уточнення тренду регіонального гідрометеорологічного режиму. Створений каталог індексів посух для агрокліматичних зон України може виступати як методологічна база для розробки системи моніторингу посух. Запропонований регіональний індекс блокування та визначені структурні особливості найбільш ймовірних висотних полів тиску можуть бути застосовані як на діагностичному, так й прогностичному матеріалі будь-якої завчасності, що дозволяє удосконалювати прогноз посушливих явищ через їх зв'язок з цими параметрами атмосфери.

Одержані в дисертації наукові результати використовуються при викладанні навчальних дисциплін: „Супутникова метеорологія”, „Регіональна синоптика”, „Довгострокові прогнози погоди” (акт впровадження від 11.03.2015 р.) та можуть дістати подальше впровадження у дисциплінах „Спеціалізовані прогнози погоди”, „Агromетеорологічні прогнози”, „Вплив кліматичних змін на галузі економіки України”.

Методика розрахунку і застосування Європейського континентального індексу блокування („Методичні рекомендації: оцінка стану блокування атмосферної циркуляції та структура висотних полів тиску під час посух в Україні”, укладач Семенова І.Г.) впроваджена в оперативну практику Гідрометцентру Чорного та Азовського морів, акт впровадження від 18.02.2015 р.

### **Особистий внесок здобувача.**

Автором сформульовані і реалізовані основні задачі дослідження та розроблена методика агromетеорологічного прогнозування урожайності озимої пшениці та ярого ячменя; зібраний та оброблений вихідний матеріал по сітковим даним реаналізу та даним глобального кліматичного моделювання полів метеорологічних величин, індексам посух, супутникової інформації та даним станційних спостережень; виконані розрахунки та аналіз

чисельних параметрів, використаних у дослідженні; проведені чисельні експерименти та верифікація розроблених моделей урожайності; складені висновки та рекомендації щодо використання отриманих результатів.

### **Апробація результатів дисертації.**

Основні результати роботи доповідалися або були представлені як тези на таких міжнародних наукових конференціях, симпозіумах, конгресах, семінарах: The Climate Symposium 2014 - Climate Research and Earth Observations from Space: Climate Information for Decision Making (Darmstadt, Germany 13-17 October 2014); Integrated Land-use Management Modelling of Black Sea Estuaries (ILMM-BSE). Second Congress (Odessa, Ukraine, 4-5 September 2014); 7<sup>th</sup> International Scientific Conference on the Global Water and Energy Cycle (The Hague, The Netherlands, 14-17 July 2014); SGEM-2014, Geoconference on Water Resources. (Albena, Bulgaria, 17-26 June 2014); Десятое сибирское совещание по климато-экологическому мониторингу (Томск, Россия, 14-17 октября 2013 г.); Davos Atmosphere and Cryosphere Assembly, DACA-13 (Davos, Switzerland, 8-12 July 2013.); 7<sup>th</sup> European Conference on Severe Storms, ECSS-2013 (Helsinki, Finland, 3-7 June 2013); 3<sup>rd</sup> International Conference on Earth System Modelling (Hamburg, Germany, 17-21 September 2012); Международный научный семинар «Проблемы и достижения долгосрочного метеорологического прогнозирования», УкрНИГМИ (Киев, Украина, 5-7 октября 2011 г.).

### **Публікації.**

Основні результати дисертаційного дослідження опубліковано у 27 наукових статтях, 2 матеріалах і 7 тезах доповідей міжнародних конференцій. З цього переліку 16 статей опубліковані в наукових фахових виданнях України та 6 статей – у виданнях інших держав за напрямком дисертації, які індексуються у міжнародних наукометричних базах (EBSCO, SCOPUS, CSA Technology Research Database, Ulrich's Periodicals Directory, Summon Serials Solutions, Google scholar, CNKI Scholar, DOAJ, INSPEC, ProQuest Atmospheric Science Journals, DOI, РИНЦ та ін.).

**Структура і об'єм дисертації.**

Дисертаційна робота має загальний обсяг 296 сторінок машинного тексту, з яких 271 сторінка належить до текстової частини, є 54 рисунки та 36 таблиць. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел із 168 найменувань і 11 додатків на 17 сторінках.

## РОЗДІЛ 1

### ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ТА МЕТОДИ ОЦІНКИ ПОСУШЛИВИХ ЯВИЩ

#### 1.1. Основні поняття та визначення, розповсюдження посушливих явищ

Кліматичні умови України є сприятливими для утворення різних типів посушливих явищ. Ці явища проявляються через деякі геофізичні та біологічні процеси, які у своєму поєднанні призводять до надлишкової втрати води живими організмами, зокрема рослинами. Якщо несприятливий комплекс температурно-вологісних чинників веде до вичерпання адаптаційних можливостей рослини, настає її зневоднення, в'янення, засихання та загибель. У кожного посушливого явища є певні граничні критерії, за межами яких воно стає небезпечним.

Виділяють такі види посушливих явищ: бездощовий період, атмосферна посуха, ґрунтова посуха, загальна посуха, фізіологічна посуха, суховій [1, 2].

Бездощовий період або бездощів'я – це інтервал часу, в якому протягом десяти днів і більше не випадають опади, або їх добова кількість не перевищує 1 мм.

Атмосферна посуха виникає на фоні тривалого бездощів'я з низькою вологістю та високою температурою повітря.

Ґрунтова посуха настає при висушуванні ґрунту, що посилюється, в результаті чого надходження води до коренів рослин сповільнюється або припиняється зовсім. Явище ґрунтової посухи часто пов'язано з недостатніми весняними запасами води в метровому шарі ґрунту, адже на протязі літніх місяців волога лише витрачається рослинами, а не поповнюється.

При поєднанні проявів атмосферної та ґрунтової посухи виникає загальна посуха, яка є особливо небезпечною для рослин через їх

неспроможність поповнюватися вологою з ґрунту на фоні високих температур повітря.

Фізіологічна посуха виникає в результаті неспроможності рослини забезпечити себе водою при достатніх запасах її в ґрунті. Така посуха може виникнути через ряд причин: при пошкодженні кореневої системи рослини; в умовах низької температури кореневого шару ґрунту та одночасно високою температурою та низькою вологістю повітря; через підвищений вміст солей в ґрунті. За таких умов швидкість всмоктування води кореневою системою відстає від швидкості транспірації, тому порушується процес живлення та розвитку рослини.

Окрім вказаних видів, за рекомендаціями Всесвітньої метеорологічної організації (ВМО) виділяють ще галузеві класифікації посухи: гідрологічні, сільськогосподарські (агрометеорологічні), енергетичні та ін.

За просторовими масштабами посушливі явища можуть бути поділені на місцеві, зональні, міжзональні, континентальні та глобальні [1]. Місцеві посухи охоплюють до 10% площі однієї агрокліматичної зони та носять строкатий характер. Зональні посухи можуть займати від 10 до 100% площі в межах однієї агрокліматичної зони. Міжзональні посухи займають не менше двох агрокліматичних зон з охопленням від 10 до 35% площі у кожній зоні. Континентальні посушливі явища 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.

Посушливі явища є комплексним проявом природних процесів, які діють односпрямовано в певний проміжок часу на створення дефіциту зволоження на фоні високих температур. Відома схема розвитку посухи Ф.Ф. Давітая [3] (рис. 1.1) дає наочно стислий механізм, за яким основним чинником, що виступає на початку формування посухи, є певні макроциркуляційні атмосферні процеси у вегетаційний період, які через тривале бездощів'я і поєднання з недостатньою вологістю ґрунту призводять

до прояву посухи. Оскільки мова йде, перед усім, про агрометеорологічну посуху, у схемі враховуються властивості рослин щодо їх стійкості до високих температур та відсутності опадів, а також відповідність агротехніки до посушливих умов.

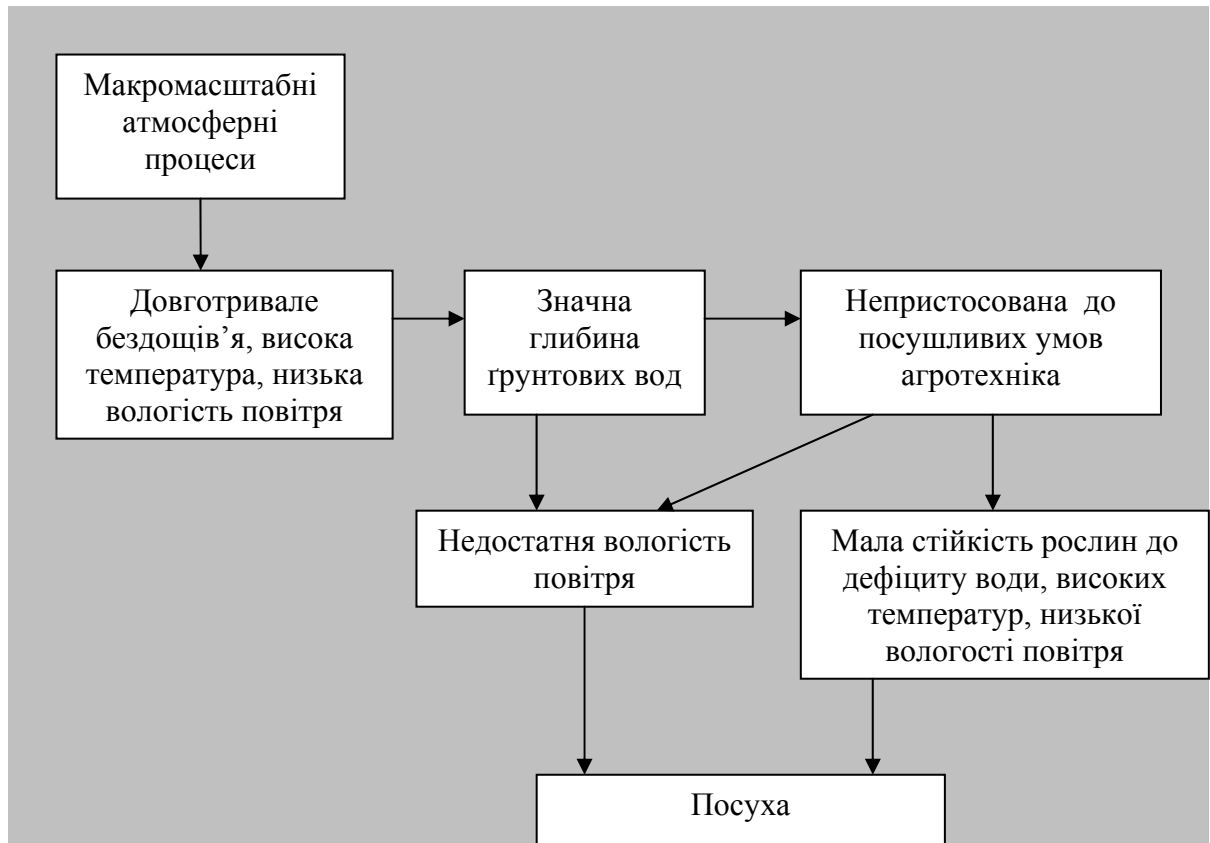


Рис. 1.1. Схема розвитку посухи за Ф.Ф. Давітая [3]

Протягом вегетаційного періоду за часом виникнення та тривалістю впливу виділяють три типи посух: весняні, літні, осінні [2].

Весняна посуха характеризується зазвичай досить низькими температурами, низькою відносною вологістю повітря, посушливими вітрами. Цей тип посухи затримує фазу сходів, послаблює куціння та укорінення рослин, зменшує кількість закладених колосків в колосі. За достатніх запасів ґрунтової вологи навесні посуха впливає на рослини незначно.

Літня посуха характеризується низькою відносною вологістю повітря, високою температурою, великою випаровуваністю. Звичайно до моменту виникнення літньої посухи в степових та лісостепових районах України

бувають недостатніми запаси вологи в орному шарі, тому негативний вплив літньої посухи на сільськогосподарські культури значно більше, ніж весняної. Літня посуха призупиняє накопичення вегетативної маси, приріст коренів, може виникнути щуплість зерна.

Осіння посуха виникає на фоні зниження температури повітря, але через відсутність опадів влітку верхній шар ґрунту може бути значно висушений. Якщо встановлюється антициклонічний характер циркуляції, характерний для осені в Східній Європі, виникає дефіцит опадів та подальше висушування ґрунту. Посіяні в таких умовах озимі культури не мають нормального розвитку і часто гинуть під час зимівлі.

Бучинський І.С. [2] класифікував атмосферні посухи вегетаційного періоду в залежності від місяця їх настання: 1) холодна – в травні; 2) літня – в червні, 3) пізня літня – в липні-серпні, комбінована, яка переривається більш м'якими погодними умовами, 4) посухи протягом всього весняно-літнього періоду.

В дослідженнях по впливу посух на урожайність зернових культур були виділені типи посух та критерії їх інтенсивності за ступенем впливу на зниження урожайності. Так, за дослідженнями Руденко А.І. [4], в період вегетації пшениці були виділені чотири типи засух на Європейській території Росії (ЄТР): 1) від посіву до початку молочної стиглості (весняно-літня посуха); 2) від посіву до воскової стиглості; 3) від кушіння до початку молочної стиглості (літня посуха); 4) в різні періоди формування врожаю пшениці. Аналіз зв'язку урожайності ярої пшениці з сумою опадів за період від сходів до колосіння показав високий коефіцієнт кореляції по різних районах: від 0,71 до 0,87.

За інтенсивністю посухи Руденко А.І. поділив на: дуже сильну – зниження врожаю більш ніж на 50%; сильну – зниження врожаю на 20-50%; середню – зниження врожаю менш ніж на 20%. При цьому кількість опадів за вегетаційний період під час дуже сильних посух складає 40-50% від норми; кількість посушливих декад від 4,5 до 5,4; сума опадів за період сходи-

колосіння близько 13-18 мм; перевищення температури повітря в середньому на 1,8-3,8 °С. За сильної посухи кількість опадів за вегетаційний період складає 62-69% від норми; кількість посушливих декад від 3,5 до 4,2; сума опадів за період від сходів до колосіння 28-35 мм; перевищення температури повітря на 2,1-2,3 °С. Середня посуха фіксується, коли кількість опадів за вегетаційний період в період складає 70-93% від норми; кількість посушливих декад від 2,8 до 3,2; сума опадів за період сходи-колосіння близько 39-42 мм, а додатна аномалія температури повітря в середньому 1,1-2,2 °С.

Процеров А.В. [2] пропонував виділяти типи посух за аналогічними критеріями: дуже сильна посуха – зниження урожайності більше ніж на 50%; сильна посуха – на 20-50%; слабка посуха – на 20%.

В якості загального біологічного (агрокліматичного) критерію посухи А.М. Алпатьєв та В.Н. Іванов [5] запропонували прийняти зниження врожаю зернових не менше ніж на 20-25% від середньої величини.

Розглядаючи урожайність сільськогосподарських культур як об'єктивний показник посух, слід враховувати, що формування врожаю, в свою чергу, залежить не тільки від посушливих умов, але й інших факторів, в тому числі несприятливих погодних явищ (сильний вітер та опади, градобиття, заморозки), біологічних чинників (пошкодження рослин шкідниками або хворобами), недотримання агротехніки тощо.

Просторово-часовий розподіл посух по території України має складний характер. Аналіз повторюваності посух за майже сторічним рядом спостережень по 47 станціях (1871-1972 рр.), проведений Бучинським І.Є. [2], показав, що максимальна повторюваність помірних посух – 50%, спостерігається у південному Степу, але в межах Донецької височини повторюваність становить менше 40%. На заході та в центрі Лісостепу і в Поліссі повторюваність помірних атмосферних посух становить 10-20%, збільшуючись на крайньому сході території до 40-45%. Сильна посуха у Поліссі та центральному і західному Лісостепу має повторюваність 4-9%, збільшується на південь у Степу та Криму до 25-35%. Дуже сильна посуха у



Поліссі, центральному та західному Лісостепу відмічається з повторюваністю 1-3% та зростає до 9-15% у Степу та Криму.

Найбільша ймовірність весняних посух (51-60%) спостерігається на півдні України, в Херсонській та Запорізькій областях. В областях степової зони ймовірність коливається в межах 30-40%, зменшуючись на північ. На північному заході та заході ймовірність весняних посух зменшується до 1-3%.

Літні посухи в Україні спостерігаються майже щорічно, їх ймовірність складає 98%. Найбільша ймовірність існує 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. В Поліссі ймовірність посух складає всього 2-3%, а в деяких західних областях осінніх посух не спостерігалось взагалі.

В каталозі весняно-літніх посух, складеному Барабаш М.Б. та Ємельяною Ж.Л. [6] по станціях України за 1900-1986 рр. було виявлено 30 посух з розповсюдженням понад 30% від площі території країни. За даними про ймовірність виникнення посух з врахуванням їх інтенсивності виділено декілька районів. Район 1 включає територію південного Степу, що прилягає до Чорного та Азовського морів – це південна частина Дніпропетровської, Донецької, Одеської, Запорізької, Миколаївської, Херсонської областей та північ Криму. В цих районах посушливі умови є невід'ємною частиною клімату – ймовірність їх виникнення складає 70%. Сильні посухи тут виникають 1 раз на 10 років, слабкі – 1 раз на 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 на 4 роки. В район 3 входить територія Лісостепу, що прилягає до Полісся – це Сумська, Київська,

Черкаська та Вінницька області. Ймовірність посух, загалом, в цьому районі складає близько 30%, а ймовірність сильної посухи не перевищує 1-2%.

Окрім посух, ще одним несприятливим явищем, яке виникає на території України та може суттєво вплинути на продуктивність рослин за відносно короткий проміжок часу, є суховій.

Під суховієм розуміють комплексне гідрометеорологічне явище, під час якого в будь-який строк спостережень метеорологічні величини одночасно досягають таких критеріїв: температура повітря не нижче +25 °С, відносна вологість повітря 30% та нижче, швидкість вітру 5 м·с<sup>-1</sup> та більше [1, 2, 7]. Вказані критерії одержані в результаті трирічних експериментальних спостережень, проведених Бучинським І.Є. по станціях України в теплий період року, та є надійними показниками початку суховію на території країни.

Суховії не пов'язані безпосередньо з посухами. Вони можуть виникати як окреме явище, супроводжувати період бездощів'я, бути передвісником посухи або виникати та припинятися під час посухи, підсилюючи тим самим її негативні прояви.

Суховії на території України утворюються за дуже різноманітних умов циркуляції атмосфери, які так чи інакше пов'язані з процесами антициклогенезу, однак не з центральними частинами баричних утворень, а їх периферіями з посиленими градієнтам тиску та вітром. Дослідження Цубербіллер О.О. [8] показали, що частіше за все суховії виникають на півдні Східноєвропейської рівнини і розвиваються на південно-західній, південній і південно-східних периферіях антициклонів або смуг підвищеного тиску, які розташовані над центром Європейської території Росії (ЄТР) або Уралом. 90% суховіїв виникають безпосередньо на території України або в прилеглих районах, інші випадки пов'язані з перенесенням повітряним потоком з сусідніх посушливих районів. Майже 82% днів з суховіями на Україні спостерігаються за антициклонічних полів – у відрогах або на периферії антициклонів, 18% випадків припадає на теплі сектори циклонів. Трансформація повітряних мас над континентом в середньому становить

+15 °C, а відносна вологість зменшується з 80-100% до 20-30%. В Східну Європу повітряні маси, в яких утворюються суховії, можуть приходити з різних районів [2, 8, 9]. Близько половини випадків пов'язані з північними або північно-західними траєкторіями повітряних мас, які починаються на узбережжі морів Арктичного басейну та опускаються на Прикаспійську низовину або Нижнє Поволжя, а потім на Україну. Близько 20% випадків пов'язані з траєкторіями з узбережжя Атлантичного океану, звідки повітря переноситься на Україну по північній периферії гребня азорського антициклону через перегрітий Європейський континент. Невелика частка траєкторій з півдня та південного сходу починається над районами Середньої Азії або Іраном. Також суховії можуть утворюватися в повітряній масі, що циркулює в системі стаціонарного антициклону над ЄТР.

По території України середня кількість днів з суховіями в вегетаційний період зменшується з південного сходу та сходу на північний захід відповідно з понад 60 днів Приазов'ї до 20 і менше в Прикарпатті [1]. За даними [2] на території країни виділяється два осередки з підвищеною повторюваністю суховіїв: в південних областях (Миколаївська, Херсонська, Дніпропетровська, Запорізька області та степовий Крим) та на сході (окремі райони Луганської і Донецької областей). На узбережжі морів кількість днів з суховієм значно менше завдяки підвищеній відносній вологості повітря.

Суховії негативно впливають на вегетацію рослин на всіх етапах. Під час суховію надходження води в листя рослин через кореневу систему не компенсує транспірацію, тобто утворюється дефіцит транспірації, який тим більше, чим сильніше висушування суховієм. Найбільшої шкоди суховій завдає зерновим в період формування колоса і наливу зерна, при якому знижується якість і кількість зерен в колосі. Внаслідок сильних вітрів виникає в'янення, скручування та підсихання листя у рослин, яке може стати безповоротним.

Враховуючи різноманіття посушливих явищ та факторів, які їх викликають, подальші розділи дисертаційної роботи зосередимо на розгляді атмосферних посух.

## 1.2. Кількісні показники посух

Дослідження посух в більшості робіт виконуються з використанням даних про режим опадів, випаровуваність, дефіцит вологості повітря, температуру повітря, радіаційний баланс тощо. Оскільки окремі метеорологічні величини не можуть описати таке складне комплексне явище як посуха, використовуються різноманітні коефіцієнти або індекси посух, які враховують як правило, умови зволоженості та температурний режим протягом певних періодів часу. Всі існуючі кількісні показники мають як переваги, так й недоліки, тому для оцінки інтенсивності та розповсюдженості посухи на конкретній території бажано використовувати декілька параметрів та їх порівняння.

Пошук критеріїв та розробка показників посух в наукових дослідженнях різних країн ведеться з 20-30-х років минулого століття, що призвело до появи великої кількості вдалих та не дуже зручних і точних чисельних критеріїв. В ранньому огляді Бучинського І.Є. [2] методів дослідження посушливих явищ перш за все згадується загальноживаний у вітчизняній метеорології гідротермічний коефіцієнт Г.Т. Селянинова, а також показники зволоженості за Несторовим В.Г. та за 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 та запасів вологи в метровому шарі ґрунту на початку весни) та ін. В сучасних дослідженнях посух все частіше застосовуються показники, які 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 [10].

Розглянемо докладніше методику розрахунку деяких показників (індексів) посух, які показали свою надійність для визначення посух, мають широке застосування на теперішній час та будуть використані в подальшому дослідженні.

**Гідротермічний коефіцієнт (ГТК)** був уведений Г.Т. Селяниновим в 30-ті роки ХХ століття та став найпопулярнішим показником посух в вітчизняній агрометеорології, який й досі має широке застосування, незважаючи на появу нових індексів [1, 11]. ГТК для окремих станцій (точок) обчислюється за формулою

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

де  $\sum R$  - сума місячних опадів в мм;

$\sum t$  - сума температур повітря в градусах Цельсія за період з середньодобовими температурами вище за +10 °С (в межах того ж місяця).

Як можна бачити з формули (1.1), розрахунок ГТК обмежений вегетаційним періодом, що передбачає коректне застосування його навесні та восени.

Селянинов Г.Т. вважав, що сума температур повітря близька до випаровування з оптимально зволоженого поля та може бути прийнята за величину максимально можливого випаровування, тобто за випаровуваність. До того ж, в літні місяці суми температур повітря, поділені на 10, добре співпадають з сумами випаровуваності за місяць, яка виміряна евапорометром Вільда [2].

ГТК характеризує не тільки прихідну частину водного балансу – опади, але й непродуктивне витрачання вологи, пов'язане з випаровуваністю з

поверхні ґрунту і рослин. Основним недоліком ГТК вважають неможливість врахування весняних запасів вологи в ґрунті, які можуть бути суттєво різними при одному й тому ж значенні ГТК протягом періоду вегетації. Тому цей коефіцієнт є хорошим показником зволоженості в тих районах, де спостерігається однорідний тип річного ходу опадів. Також недоліком ГТК є те, що в якості показника випаровуваності використовується лише температура повітря, хоча вона тісно корелює з дефіцитом вологості, який більш відповідає інтенсивності випаровуваності. Цей зв'язок добре працює в степових районах, але може бути порушений в прибережних територіях, тому тут ГТК буде неточним [12]. Перелічені недоліки ГТК можуть бути усунені розрахунком так званого водно-термічного коефіцієнту (ВТК), який безпосередньо враховує швидкість вологообміну між підстильною поверхнею і атмосферою та процеси випаровування [1]. ВТК може розраховуватися за температури нижче  $+13^{\circ}\text{C}$ , що дозволяє використовувати його протягом року та доповнювати відсутні у холодний період дані про ГТК.

Дослідження кліматичного розподілу ГТК по території колишнього СРСР показало, що північна межа степової зони співпадає з ізолінією ГТК = 1 за червень-серпень (для Одеси ГТК = 0,7), північна межа пустелі – з ізолінією ГТК = 0,5 (для Ташкента ГТК = 0,1). При цьому посушливим вважається період, протягом якого ГТК < 1,0, сухим – період, коли ГТК < 0,5 [1, 2].

Аналіз просторово-часового розподілу ГТК для території України, виконаний в кліматичний період 1960-1990 рр., дозволив встановити середні характеристики цього параметру протягом вегетаційного сезону [1]. Так, в роботі [13] показано, що для середніх обласних значень ГТК характерно їх зменшення з заходу та північного заходу на південь та південний схід. В Поліссі ГТК змінюється від 1,6 (Житомирська область) до 1,2 (Сумська область). В Карпатах значення ГТК максимальні та досягають 2,5. В західних областях Лісостепу ГТК коливається в межах 1,4-1,7, в східних районах ГТК зменшується до 1,0. В північному Степу значення ГТК дорівнюють 0,8-1,0. В південному Степу ГТК змінюється від 0,7 в Херсонській області до 0,9 в

Миколаївській області. Динаміка зміни ГТК протягом вегетаційного періоду показує, що для областей західного Лісостепу спостерігається зниження значень ГТК до осені з мінімумом в вересні або серпні. На решті території Лісостепу та Степу мінімальні значення ГТК спостерігаються, в основному, в серпні або також й в липні, причому до осені ГТК підвищується.

Визначення критеріїв інтенсивності посух в Україні за значеннями ГТК запропоновано в роботах [6, 14].  $ГТК < 0,5$  відповідає дуже посушливому стану (сильна посуха),  $ГТК = 0,6-0,7$  відповідає середнім умовам посухи,  $ГТК = 0,8-0,9$  вказує на слабку посуху. Використовуючи ГТК для визначення інтенсивності посух, слід також звертати увагу на площу охоплення посухою з відповідним чисельним критерієм. Якщо посуха охоплює від 1 до 10% досліджуваної території, вона відноситься до локальних. При охопленні 11-20% території посухи є поширеними (помірними), а при 21-30% - вельми поширеними (сильними). При розповсюдженні посухи на 31-50% території вона визначається як екстремальна (надзвичайна), а якщо поширення посухи перевищує 50%, вона вважається катастрофічною [6].

Порівняння критеріїв ГТК з показниками урожайності ярої пшениці в степовій та лісостеповій зонах ЄТР показало [2, 5, 15], що зниження врожаю в цих зонах більше ніж на 20-25% від середнього рівня відповідає  $ГТК = 0,5-0,7$ , який вказує на посуху. При більших значеннях ГТК відмічаються лише поодинокі випадки значного зменшення урожайності.

Загалом, на даний час прийняті наступні критерії ГТК для визначення інтенсивності атмосферних посух в агрокліматичних зонах України [1]: 0,7-1,0 – помірна посуха; 0,5-0,7 – сувора посуха; 0,3-0,5 – дуже сувора посуха.

**Загальний індекс посушливості  $S_i$**  був уведений в роботах Д.А. Педя [16, 17] та дістав подальшого розвитку в дослідженнях Російського ГМЦ в роботах Садкова В.П. та ін. [18-20].

Даний індекс розраховується з використанням аномалій температури та опадів, а також вологозапасів ґрунту за певний місяць

$$S_i = \frac{\Delta T}{\sigma_T} - \frac{\Delta R}{\sigma_R} - \frac{\Delta W}{\sigma_W}, \quad (1.2)$$

де  $\Delta T$ ,  $\Delta R$ ,  $\Delta W$  - аномалії місячних значень температури повітря, опадів та вологозапасів ґрунту відповідно;

$\sigma_T$ ,  $\sigma_R$ ,  $\sigma_W$  - середньоквадратичні відхилення місячних значень температури повітря, опадів та вологозапасів ґрунту відповідно.

Посушливим вважається стан, коли  $S_i$  має додатні значення, посуха настає, коли індекс  $S_i \geq 2,0$ . Від'ємні значення індексу  $S_i$  характеризують, навпаки, умови вологих періодів, при цьому величини індексу менше за  $-2,0$  свідчать про значне перезволоження завдяки понаднормовій кількості опадів.

Формула (1.2) дає інформацію про загальну атмосферно-ґрунтову посушливість в певному районі. Оцінка атмосферних умов та стану ґрунту в параметрі  $S_i$  показала [19], що основний внесок в значення дає атмосфера посушливість, тому формулу (1.2) можливо розбити на дві, які визначають атмосферну  $S_a$  (1.7) та ґрунтову  $S_n$  (1.8) посушливість окремо

$$S_a = \frac{\Delta T}{\sigma_T} - \frac{\Delta R}{\sigma_R}, \quad (1.3)$$

$$S_n = \frac{\Delta W}{\sigma_W}. \quad (1.4)$$

Порівняння показників атмосферної та ґрунтової посухи з урожайністю зернових культур в деяких південно-східних областях ЄТР показало, що в 74% років з посухою ( $S_i \geq 2,0$ ) відмічався неврожай [19].

Сукупний аналіз циркуляційних умов та розподілу індексу атмосферної посушливості  $S_a$  під час масштабних посух на ЄТР визначив, що осередки максимальних значень  $S_a$  збігаються з положенням гребневих структур



осередненого за місяць висотного поля тиску, а також позитивних аномалій температури і негативних аномалій опадів [20].

Незважаючи на відносну простоту розрахунку, даний індекс не набув популярності в оперативній практиці, а використовується переважно в наукових дослідженнях для експериментальних розрахунків на обмежених територіях.

**Індекс Палмера.** У 1965 в США В. Палмер запропонував індекс для визначення метеорологічних умов, що відповідають аномально сухим або аномально вологим періодам на тривалих проміжках часу [21]. Для обчислення індексу Палмера використовується спрощене рівняння водного балансу, основними параметрами якого є дані про температуру повітря і кількість опадів, а також постійні параметри, які характеризують вологоємність ґрунту.

Надамо коротку характеристику методики розрахунку індексу Палмера, описану в дослідженнях [21-23]. Обчислення індексу проводиться в два етапи. Спочатку визначається значення індексу аномальності зволоженості  $Z$  (moisture anomaly index), який вимірює аномалію вологи поверхні ґрунту для поточного місяця без врахування попередніх умов.  $Z$ -індекс може характеризувати агрометеорологічну посуху, так як швидко відкликається на зміну вологості ґрунту

$$Z = dk, \quad (1.5)$$

де  $d$  - аномалія вологозабезпеченості;

$k$  - деякий коефіцієнт, пов'язаний з кліматичними значеннями водно-балансових параметрів.

Параметр  $d$  розраховується як різниця між фактичною кількістю опадів ( $P$ ) і потенційно необхідною кількістю опадів ( $\hat{P}$ ), яка потрібна для підтримки нормальної вологості ґрунту в поточних умовах

$$d = P - \hat{P}. \quad (1.6)$$

Розрахунок  $\hat{P}$  здійснюється за спрощеним аналогом рівняння водного балансу, яке описує потенційні для умов даного місяця притоки-відтоки вологи в ґрунті

$$\hat{P} = ET + R + RQ - L, \quad (1.7)$$

де  $L$  – втрати ґрунтової вологи;

$ET$  – евапотранспірація;

$R$  – чистий приток вологи в ґрунті;

$RQ$  – стік вологи.

В. Палмер використав двошарову модель для обчислення вологості ґрунту, при цьому були введені деякі припущення щодо властивостей ґрунту утримувати воду та передавати її між шарами (на основі обмежених даних для центральної частини США). До того ж, обрані два шари ґрунту не завжди можуть точно відповідати конкретній місцевості [21-22, 24].

Коефіцієнт  $k$  розраховується як кліматична характеристика по відповідних кліматичних значеннях вхідних параметрів для кожного місяця:

$$k = (\overline{PE} + \overline{R}) / (\overline{P} + \overline{L}), \quad (1.8)$$

де  $\overline{PE}$  - осереднена потенційна евапотранспірація;

$\overline{P}$  - осереднена кількість опадів;

$\overline{L}$  - осереднений відтік ґрунтової вологи;

$\overline{R}$  - осереднене відновлення ґрунтової вологи.

Значення  $k$  оцінюється за даними багаторічних спостережень складових водного балансу в досліджуваному районі з використанням емпіричної

константи, визначеної В. Палмером на основі аналізу даних спостережень в дев'яти пунктах на території США.

Поточне значення індексу Палмера розраховується як зважена сума значення індексу на попередньому часовому інтервалі ( $i-1$ ) і поточного значення індексу аномальності зволоженості  $Z$  [21]:

$$X_i = 0,897X_{i-1} + \frac{1}{3}Z_i, \quad (1.9)$$

де  $X$  – індекс суворості посухи Палмера, PDSI (Palmer Drought Severity Index);

$i$  – номер місяця.

Чисельні значення констант в (1.9) були визначені за даними спостережень на двох північноамериканських станціях і відбивають чутливість індексу Палмера до випадіння опадів.

Для інтерпретації значень індексу суворості посухи (PDSI) В. Палмер виділив 11 градацій (табл. 1.1). При цьому він довільно вибрав масштаб класифікації режимів вологості, заснованих на його оригінальних спостереженнях в областях дослідження в центральному Канзасі і західній Айові. Зазвичай, PDSI змінюється від -6,0 до +6,0.

Індекс Палмера є популярним в США завдяки таким позитивним характеристикам [22, 24]: а) він забезпечує вимір аномальності недавньої погоди для регіону; б) він забезпечує можливість зіставити поточні умови з історичними; в) він забезпечує представлення про просторово-часовий розподіл історичних посух. Декілька штатів, у тому числі Нью-Йорк, Колорадо, Айдахо і Юта, використовують індекс Палмера як частину системи моніторингу посух. Індекс Палмера обчислюється щомісячно для кожного кліматичного поясу в Сполучених Штатах і вноситься до архіву з 1895 р., який зберігається в Національному Кліматичному Центрі Даних (NCDC). Крім того, щотижневі значення PDSI обчислюються протягом кожного вегетаційного сезону і доступні в щотижневику „Weekly Weather and

Crop Bulletin". Карты щотижневого індексу Палмера від Центру Передбачення Клімату (CPC) також доступні на веб-сайті CPC (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>).

Таблиця 1.1

Типізація умов зволоженості та посушливості за індексом Палмера

Інтервал індексу PDSI	Умови зволоженості
4,00 або більше	Надзвичайно вологий період
від 3,00 до 3,99	Дуже вологий період
від 2,00 до 2,99	Помірно вологий період
від 1,00 до 1,99	Слабко вологий період
від 0,50 до 0,99	Початок вологого періоду
від 0,49 до -0,49	Близько норми
від -0,50 до -0,99	Початок сухого періоду
від -1,00 до -1,99	М'яка посуха
від -2,00 до -2,99	Помірна посуха
від -3,00 до -3,99	Сильна посуха
-4,00 або менше	Екстремальна посуха

Поряд з відомими перевагами індексу Палмера, є певні недоліки, на які звертали увагу багато дослідників і які дозволяють використовувати цей параметр з суттєвим обмеженням. Висвітлення цієї проблеми найбільш повно узагальнено в роботі [24], з якої й наведемо основні зауваження.

1. Реальні та потенційні значення складових водного балансу (1.7) обчислюються за допомогою спрощеної схеми вологопереносу в ґрунті, з визначенням емпіричних коефіцієнтів, які враховують осереднені показники складових водного балансу для даної місцевості. В оригінальному дослідженні В. Палмера [21] для розрахунку потенційної евапотранспірації використовувався метод С. Торнтвейта [25, 26], якій, враховуючи визначення *PET* за Г. Пенманом [27], передбачає, що випаровуваність вологи з верхнього шару ґрунту відбувається з потенційною швидкістю, доки уся доступна волога в цьому шарі не буде вичерпана. І тільки потім може бути видалена

волога з нижнього шару ґрунту. Слід зазначити, що таке припущення є лише грубим наближенням навіть для оголеної поверхні ґрунту, не враховуючи наявності рослинності [22, 28].

Метод Торнтвейта для оцінки потенційної евапотранспірації базується лише на температурі повітря (враховуючи 12-годинну тривалість світлового дня та 30-денну тривалість календарного місяця):

$$PET = 1,6 \left( \frac{10T_a}{I} \right)^a, \quad (1.10)$$

де  $T_a$  – середньомісячна температура повітря;

$I$  – індекс тепла, який визначається за формулою

$$I = \sum_{i=1}^{12} \left( \frac{T_{ai}}{5} \right)^{1,514}, \quad (1.11)$$

де температура повітря  $T_a$  сумується за дванадцятимісячний період;

$$a = 0,49239 + 0,01792 \cdot I - 0,0000771 \cdot I^2 + 0,000000675 \cdot I^3. \quad (1.12)$$

В моделі Палмера також не враховуються інші фактори, такі як відносна вологість повітря, швидкість вітру, зміна кількості сонячної радіації через зміну хмарності або концентрації аерозолів, хоча ефект сонячного випромінювання враховується неявно через температуру поверхні ґрунту. В подальшому удосконаленні індексу Палмера визначення потенційної евапотранспірації було замінено емпіричними способами оцінки для поліпшення врахування фізичних механізмів, що впливають на випаровуваність.

На сьогодні перспективним вважається використання методу автоматичного локального калібрування індексу, який передбачає перехід до

обчислення змінних коефіцієнтів рівняння водного балансу відповідно до кліматичних особливостей місцевості, для якої ведеться розрахунок. Цей метод викладений в роботі Велеса Н. та ін. [23], де описано алгоритм заміни емпірично отриманих кліматичних характеристик (коефіцієнт  $k$  в формулі (1.5)) і факторів тривалості (константи 0,897 та  $1/3$  в формулі (1.9)) величинами, що обчислюються автоматично на основі кліматичних даних місцевості. Аналіз часових рядів локально каліброваного індексу Палмера (self-calibrating PDSI або sc-PDSI) показав кращу узгодженість з загальними та екстремальними умовами зволоженості і посухи на території США, ніж простий індекс PDSI.

2. Значення, що кількісно визначають інтенсивність посухи і сигналізують про початок/кінець посухи або вологого періоду, були довільно вибрані Палмером при вивченні умов центрального Канзасу і західної Айови.

3. Індекс Палмера є чутливим до доступної вологоємності ґрунту. Тому застосування індексу може бути дуже загальним для різних кліматичних зон.

4. В моделі Палмера всі опади вважаються рідкими, наявність снігу, снігового покриву і замерзлого ґрунту не враховується. Тобто, значення PDSI можуть бути некоректними в зимовий та весняний періоди в регіонах, де є сніг.

5. В моделі не закладено природну затримку між тим, коли випадають опади і коли відбувається результуючий стік. Крім того, не враховується здатність поверхні ґрунту і підповерхневих шарів заповнюватися водою, що призводить до недооцінки стоку.

Хоча індекс посушливості Палмера був розроблений для умов території США, проведені об'єктивні оцінки глобально розрахованого індексу показали задовільну узгодженість з агрометеорологічними та гідрологічними показниками в різних районах Земної кулі. В роботах Даї та ін. [22, 28] наведені результати дослідження зв'язку індексу Палмера з вологовмістом ґрунту в метровому шарі, що отриманий за даними спостережень. В середньому, по регіонах на різних континентах (США, Монголія, Китай,

частини Східної Європи) коефіцієнт кореляції ( $r$ ) між PDSI та вологовмістом ґрунту коливається в межах 0,5-0,7, з найбільш сильним зв'язком в літні та осінні місяці, та більш слабким – навесні.

В регіонах, найближчих до території України, кореляційний зв'язок за період 1972-1985 рр., як можна бачити на рис. 1.2, досить високий. Ці дані отримані для теплого періоду року квітень (травень) - листопад, відповідно по 14 (box 2) та 8 (box 3) станціям спостережень за вологістю ґрунту. В зазначених дослідженнях також показано, що кореляційний зв'язок PDSI з даними про вологість ґрунту вище, ніж з даними про опади, тобто індекс Палмера краще відбиває умови стану зволоженості поверхні ґрунту, ніж режим опадів, очевидно, через кумулятивний ефект методики розрахунку. Ця властивість індексу Палмера є більш корисною для дослідження агрометеорологічних та гідрологічних посух, які визначаються як режимом опадів, так й зволоженістю ґрунту, ніж атмосферних посух, які залежать переважно від характеру атмосферної циркуляції та режиму опадів.

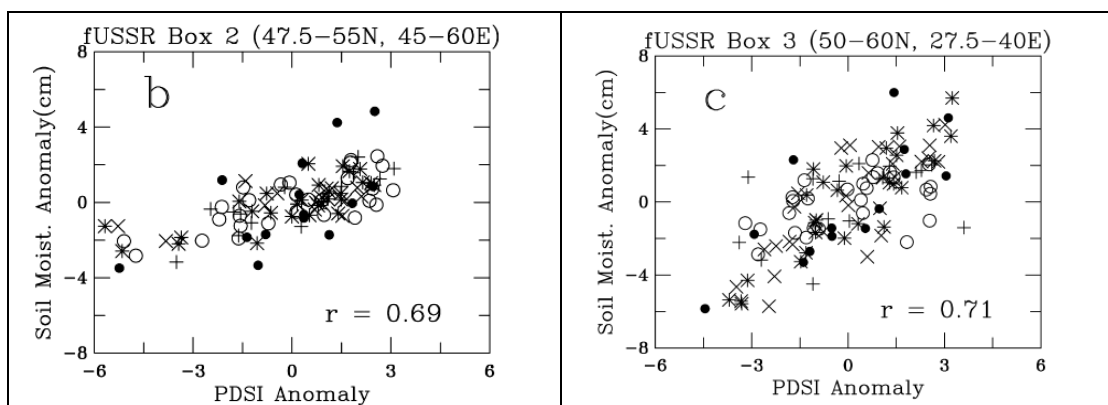


Рис. 1.2. Зв'язок місячних аномалій PDSI з спостереженням вологовмістом ґрунту в метровому шарі в регіонах Східної Європи [22]

Через ряд обмежень у застосуванні індекс Палмера не є розповсюдженим у вивченні посух на території Східної Європи, зокрема на території України. Так, аналіз динаміки посух на ЄТР з 1936 по 2010 роки, проведений в роботі [28] за допомогою індексу PDSI, показав, що найбільш

поширені та інтенсивні весняні і літні посухи спостерігалися в 1936, 1939, 1972, 1975, 2002 та 2010 рр. При цьому порівняння з площею посух, розрахованих в ті ж роки з використанням гідротермічного коефіцієнту (нормалізованого) показало, що часто у випадку поширених посух площа обхвату за індексом Палмера більша, ніж за ГТК. Дослідження повторюваності посух на території України за період 1943-2002 рр. з використанням індексу Палмера, виконане в [30], показало, що в період 1973–2002 рр., який характеризувався глобальним потеплінням, кількість посушливих місяців зменшилася на сході та півночі країни і збільшилася в інших областях порівняно з періодом відносного похолодання в 1943-1972 рр. При цьому на півдні та заході країни відбувалося збільшення тривалості посух, а в деяких областях і їх інтенсивності. Аналіз сильних весняно-літніх посух, виконаний за допомогою індексу Палмера в роботі [31] виявив, що в період 1991-2010 рр. порівняно з 1953-1990 рр. частота посух в травні та червні збільшилася в середньому в 2-2,5 рази в південних, південно-західних, в частині східних та центральних областей та майже не змінилася на решті території України.

**Стандартизовані індекси опадів SPI та SPEI.** Стандартизований індекс опадів SPI (the Standardized Precipitation index), широко використовується в зарубіжних дослідженнях та базується на оцінці режиму опадів в певні проміжки часу. Індекс SPI, рекомендований ВМО для моніторингу посух [32], був запропонований в роботі Маккі Т.Б. та ін. [33] і ґрунтується на використанні часових рядів місячних сум опадів. Набір даних по опадам береться для безперервного періоду, тривалість якого повинна бути не менш ніж 30 років. Набір періодів для усереднювання обирається для деяких масштабів часу, які, в залежності від задачі, що розв'язується, звичайно складають 1, 3, 6, 12, 24 або 48 місяців. Це довільно обрані масштаби, але вони є типовими для формування дефіциту опадів і його впливу на водоймища і вологовміст ґрунту. До ряду даних застосовується функція гамма-розподілу для визначення взаємозв'язку ймовірності та опадів.



Як тільки такий взаємозв'язок встановлений з історичних записів, обчислюється ймовірність будь-яких спостережуваних опадів в пункті, яка використовується разом з оцінкою оберненого нормального розподілу, обчисленого як відхилення опадів від щільності нормального розподілу з середнім нульовим значенням стандартного середньоквадратичного відхилення

$$SPI = F^{-1}G(R), \quad (1.13)$$

де  $G$  – інтегральна функція гама-розподілу;

$R$  – кількість опадів;

$F^{-1}$  – обернений нормований гаусів розподіл.

Обчислені додатні значення SPI вказують на більшу, ніж в середньому, кількість опадів, від'ємні значення – навпаки. Часовий крок (масштаб часу) в один місяць (SPI1) означає, що для розрахунку використовуються дані по опадах лише за один місяць, тому часовий розподіл SPI1 має схожість з розподілом місячних сум опадів та є корисним для оцінки атмосферних посух. Для розрахунку SPI3 використовуються дані по опадах за три місяці – поточний і два попередніх. Тобто, SPI3 показує короткострокові і середньострокові умови зволоженості і забезпечує сезонну оцінку опадів, тому цей часовий масштаб широко використовується для виявлення агрометеорологічної посухи. Часовий масштаб SPI12 і вище визначає загальні умови зволоженості протягом року і використовується для виділення тривалих сухих і вологих періодів, які характерні для опису гідрологічних посух [34].

Стандартизований індекс опадів SPI має деякі особливості, які роблять його вельми корисними для застосування в будь-якій місцевості, а саме [33]:

- SPI пов'язаний з ймовірністю;

- опади, що використані для обчислення SPI, можуть бути взяті для обчислення дефіциту опадів (або відсотку від середньої кількості) в поточний період;

- SPI має нормальний розподіл, тому може бути використаний для моніторингу як сухих, так і вологих періодів незалежно від ступеню аридності клімату;

- SPI може бути обчислений 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. 1.2.

Таблиця 1.2

## Критерії для інтерпретації індексів SPI, SPEI

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

Існуючі оцінки просторово-часового розподілу стандартизованого індексу опадів SPI для території України показали, що в період 1980-2009 рр. спостерігалася тенденція до збільшення кількості посух порівняно з періодом

1950-1979 рр., а максимум повторюваності посух спостерігався в Миколаївській, Херсонській, Одеській і Вінницькій областях [35].

Методика розрахунку і застосування SPI передбачає прийняття, принаймні, двох припущень. По-перше, мінливість опадів вважається значно більшою, ніж інших величин (наприклад, температури або евапотранспірації), які впливають на утворення посухи. По-друге, інші величини стаціонарні, тобто не мають часового тренду. 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. [36, 37] шляхом врахування випаровуваності за допомогою показника евапотранспірації. Запропонований стандартизований індекс опадів-евапотранспірації SPEI (the Standardized Precipitation Evapotranspiration index) розраховується за процедурою, аналогічною розрахунку SPI. Проте, замість опадів для обчислення SPEI використовуються різниці ( $D$ ) місячних сум опадів ( $R$ ) і потенційної евапотранспірації ( $PET$ ):

$$D_i = R_i - PET_i, \quad (1.14)$$

де  $i$  – порядковий номер розрахункового місяця.

Даний вираз відображує в спрощеному вигляді схему водного балансу вертикального стовпа ґрунту від її поверхні до глибини, де припиняється волого обмін [36]. Хоча вираз (1.13) не враховує вологообмін поверхні ґрунту з нижче розташованими шарами, він виявився задовільним для врахування впливу температурного режиму на сумарну зволоженість.

Для визначення  $PET$  розробники індексу SPEI скористалися вже згадуваним методом Торнтвейта [25], що зробило новий індекс майже таким же чутливим до вмісту вологи у ґрунті, як і індекс Палмера [37, 38].

Процедура розрахунку SPEI включає перетворення часових рядів  $D$  з використанням трипараметричного лог-логістичного імовірнісного розподілу,

де досліджувана змінна  $x$  знаходиться в діапазоні ( $\gamma > x < \infty$ ), а  $\gamma$  є параметром початкового розподілу.

Для моделювання значень  $D$  на різних часових масштабах використовують ймовірнісну функцію щільності трипараметричного лог-логістичного розподілу

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} \left( \frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \left( 1 + \left( \frac{x-\gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right)^{-2}, \quad (1.15)$$

де  $\alpha$ ,  $\beta$  та  $\gamma$  – відповідно, параметри масштабу, форми та походження для  $D$ , яке належить до інтервалу  $\gamma > D < \infty$ .

Лог-логістичний розподіл застосовується для стандартизації рядів  $D$  на всіх часових масштабах у вигляді функції

$$F(x) = \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{x-\gamma} \right)^{\beta} \right]^{-1}. \quad (1.16)$$

Значення  $F(x)$  трансформують до нормованих величин за допомогою наступної апроксимації [39]

$$SPEI = W - \frac{c_0 + c_1 W + c_2 W^2}{1 + d_1 + d_2 W^2 + d_3 W^3}, \quad (1.17)$$

де  $c_0$ ,  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  – константи ( $c_0 = 2,515517$ ,  $c_1 = 0,802853$ ,  $c_2 = 0,010328$ ,  $d_1 = 1,432788$ ,  $d_2 = 0,189269$ ,  $d_3 = 0,001308$ );

$W$  – ймовірнісно-зважені моменти,

$$W = \sqrt{-2 \ln(P)}, \quad \text{при } P \leq 0,5, \quad (1.18)$$

де  $P = 1 - F(x)$ .

Значення індексу SPEI, як і SPI, стандартизуються для можливості порівняння з іншими величинами в різних географічних пунктах і на різних проміжках часу. Критерії для визначення посушливих або вологих умов також представлені в табл. 1.2.

У виконаних для території України дослідженнях посух із застосуванням індексу SPEI показано, що протягом другої половини ХХ століття і на початку поточного століття найбільша кількість посух спостерігалася в останні тридцять років (1981-2010 рр.), при цьому осередок максимальної повторюваності інтенсивних засух розташовувалася в південних і південно-західних областях - Чернівецькій, Одеській і Миколаївській [40].

Як вже згадувалося вище, стандартизовані індекси опадів, зокрема SPEI, знайшли широке застосування також для виявлення гідрологічних посух та визначення зв'язку між посушливими періодами та параметрами гідрологічного стоку. Так, для українських річок в роботі [41] знайдені статистично значущі залежності в осінні місяці та в грудні на річках Північного Причорномор'я (Савранка та Тілігул) між середніми місячними і добовими витратами води та місячними значеннями індексу SPEI. В дослідженні [42] для масштабів часу 12 та 24 місяці показано, що періодам з мінімальним середнім річним стоком на р. Південний Буг відповідали періоди найбільш тривалих та інтенсивних посух, визначених за індексом SPEI. В аналізі статистичного зв'язку між індексом SPEI на масштабах від 1 до 48 місяців та деякими гідрологічними показниками р. Південний Буг виявлені масштаби найтіснішого кореляційного зв'язку, які дозволяють використовувати індекс посушливості при моделюванні [43]. Так, для річного стоку максимальні показники коефіцієнту кореляції ( $r$ ) спостерігаються для SPEI на масштабах 23-24 місяці, а також 48 місяців ( $r = 0,71$ ). Для фаз весняного водопілля найбільш тісний зв'язок відзначається на масштабі 3-4 місяці. Для стоку літньо-осінньої межени значущі та малозмінні коефіцієнти кореляції ( $r = 0,55-0,65$ ) спостерігаються на масштабах від 3 до 48 місяців.

Для стоку зимової межени коефіцієнти кореляції найнижчі ( $r = 0,44-0,45$ ), а взаємозв'язок стає значущим на масштабах 9-12 місяців.

### 1.3. Характеристика бездощових періодів в Україні

#### 1.3.1. Умови виникнення та розповсюдження бездощових періодів

Поняття бездощових періодів використовують для оцінки кліматичних умов сільськогосподарського виробництва на відносно невеликі часові періоди. Бездощові періоди виступають критерієм посушливості, адже характеризують тривалість періоду без ефективних опадів. Ефективність опадів оцінюється як їх кількість, яка може бути якось використана рослинами. Як зазначав Бучинський І.Є. [2], ще ранніми експериментальними дослідженнями встановлено (зокрема, Ротмістеровим В.Г.), що опади до 1 мм не засвоюються рослинами, а до 3 мм звичайно не підвищують вологість ґрунту, але опади до 5 мм влітку звожують поверхневий шар ґрунту і можуть бути використані рослинами за умови, якщо ґрунт не є сухим. Опади до 5 мм можуть суттєво знизити температуру ґрунту, а також підвищити вологість приземного шару повітря, що навіть влітку, особливо при похмурій погоді, створює сприятливі умови для росту рослин. Отже, саме кількість опадів у 5 мм береться як критерій ефективних опадів [44, 45].

При складанні агрометеорологічних щорічників та агрокліматичних довідників бездощовим вважають період 10 діб та більше без опадів або з незначною кількістю (менше 1 мм) [1]; бездощовий період вважають перерваним, якщо опадів випало не менше 5 мм за добу, або 1,0-4,9 мм, якщо вони випадають декілька разів з перервою менше 10 днів.

Тривалість бездощових періодів визначається перш за все циркуляційними умовами атмосфери, а також умовами рельєфу місцевості. Найбільшу повторюваність та тривалість бездощових періодів забезпечують антициклонічні поля різних типів, з яких особливо виділяються стаціонарні

(блокуючі) антициклони, пов'язані з азорським максимумом або арктичного походження. Менш тривалими є бездошові періоди в малорухомих областях або смугах підвищеного тиску. Найменшу тривалість мають бездошові періоди, пов'язані з процесами транзитного антициклогенезу західного типу, завдяки перенесенню відносно вологого атлантичного повітря в цих баричних утвореннях.

Відомості про розповсюдження і характер бездошових періодів у вегетаційний період (квітень-жовтень) на території України наприкінці XIX - першу половину XX століття (1891-1959 рр.) повно розглянуті в дослідженнях Розової Е.С. [45-46]. Отримано, що найбільш тривалі бездошові періоди спостерігалися в південних районах країни та в Криму - середня максимальна тривалість коливається від 40 до 50 діб. Максимальна тривалість спостерігалася в Одеській, Миколаївській, Херсонській областях та в Криму – 101-108 діб, а також у Полтаві – 115 діб (1934 р.). Найменша максимальна тривалість відмічалася в західних та північних областях України – в середньому 23-35 днів.

Найчастіше бездошові періоди трапляються в серпні-жовтні, але можуть починатися й на початку літа. Тривалі осінні бездошові періоди спостерігаються в західних областях, а також на південному сході і в центрі країни. На решті території частіше спостерігаються весняні посухи (звичайно, з березня по травень). На узбережжі морів та на Південному березі Криму через розвиток бризової циркуляції [47] найбільш тривалі бездошові періоди відмічаються всередині вегетаційного періоду.

За доповненими даними періоду 1960-1990 рр. отримано, що середня тривалість бездошових періодів в Степу становить 12-16 днів, в Лісостепу та Поліссі – 9-11 днів [1]. Повторюваність бездошових періодів тривалістю 10-20 днів становить від 18 до 27% по всіх агрокліматичних зонах. Повторюваність бездошових періодів тривалістю 21-30 днів коливається від 4-9% в Лісостепу та Поліссі і до 13% в Степу. Повторюваність періодів тривалістю 31-40 днів становить не більше 5% в Лісостепу та Поліссі і до 8% в Степу. Більш

тривалі бездошові періоди спостерігаються не частіше 1-2% по території країни і в 5% випадків в окремих областях Степу.

Гідрометеорологічний режим під час бездошових періодів відрізняється підвищеною посушливістю на фоні високих температур повітря [1]. Максимальні температури в тривалі бездошові періоди на заході України становлять в 30% випадків понад  $+25^{\circ}\text{C}$  (іноді вище  $+30^{\circ}\text{C}$ ). В східних областях 35-45% випадків доводиться на температури понад  $+30^{\circ}\text{C}$ . На півдні температура понад  $+30^{\circ}\text{C}$  спостерігається у 40-50% випадків, понад  $+35^{\circ}\text{C}$  – в 3-8% випадків. Відносна вологість іноді при цьому знижується до 20% та нижче. При бездошових періодах переважають слабкі вітри швидкістю до  $5 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ , за різних напрямків. В степових районах при сильних вітрах можуть розвиватися суховії та пилові бурі.

### 1.3.2. Повторюваність бездошових періодів у поточних кліматичних умовах

Спираючись на агрометеорологічне визначення бездошового періоду, в даному дослідженні такі періоди були обчислені для теплих сезонів (квітень-жовтень) 1995-2012 рр. по 14 станціях України. Відомості про добові суми опадів отримані з кліматичної бази даних Європейського кліматичного проекту ECA&D (European Climate Assessment & Dataset project; <http://www.ecad.eu>). Ця база використовує дані Регіонального кліматичного центру ВМО (Регіон VI), а сам проект підтримується організацією EUMETNET та Європейською комісією. Одержана інформація про повторюваність та сумарну тривалість бездошових періодів наведена у Додатку А. Згідно даних табл. А.1, по території країни в розглянутий період кількість бездошових періодів коливалася від 1 до 8 за сезон. Найбільша їх кількість та тривалість спостерігалася в південних областях, на сході, а також в центрі, найменші значення зафіксовані в західних та північних областях. Найбільша середня кількість бездошових періодів спостерігалася в Одесі –



5,8, при найбільшій середній та максимальній сумарній тривалості – 96,1 та 143 дні відповідно. По інших містах південних та східних областей середня кількість бездощових періодів коливається від 4,5 в Харкові до 5 в Сімферополі, при середній сумарній тривалості від 63,9 днів в Сумах до 94,5 днів в Сімферополі. В центральних, північних та західних областях України кількість бездощових періодів знижується і коливається в межах від 3,1 на заході до 4,1 в центрі.

Середня сумарна кількість днів у бездощових періодах за сезон коливається від 43-54 днів в західних областях і 56-64 днів на півночі та в центрі і зростає до 72-96 днів на півдні та сході країни [48]. Максимальні значення сумарної кількості днів у бездощових періодах досягали 131 день в Луганську (1998 р.), 137 день в Сімферополі (2009 р.) та 143 дні в Одесі (2012 р.).

Аналіз міжрічного ходу сумарної тривалості бездощових періодів показав, що в південних та східних областях найбільш тривалими були періоди в 1998, 1999, 2005, 2011 та 2012 рр. По північних та центральних областях найбільшою тривалістю виділяються періоди 1995, 2000, 2009 та 2011 років, в західних областях – 2000, 2005, 2009 та 2011 років. Слід зазначити, що при цьому не завжди максимальна повторюваність бездощових періодів співпадала з максимальною сумарною тривалістю.

В табл. 1.3 наведена загальна характеристика бездощових періодів, що спостерігалися протягом досліджуваних сезонів. Так, середня кількість днів у бездощових періодах коливається від 18,8 в Сімферополі до 14 в Чернівцях та Сумах, і складає в середньому по Україні 14 днів. Найбільш тривалі бездощові періоди – 15-18 днів, траплялися в південних та східних областях, а також в Рівненській області. Максимальна тривалість є найбільшою в Сімферополі (55 днів), Луганську (50 днів) та Одесі (43 дні), на решті території коливається в межах 25-38 днів. Середня максимальна кількість днів у бездощових періодах по станціях України становить 34,6 дні.

Розподіл повторюваності по градаціях тривалості показав, що в усіх областях найбільша кількість бездошових періодів має тривалість від 10 до 20 днів – від 68,1% у Сімферополі до 93,1% у Чернівцях та Житомирі. При цьому, в південних, центральних та східних областях частка коротких бездошових періодів менше, ніж в західних та північних областях. В Одесі та Сімферополі частка періодів тривалістю 21-30 днів складає 19 та 22% відповідно, для інших пунктів цей показник є майже вдвічі меншим. Бездошові періоди тривалістю 31-40 днів спостерігалися тільки в половині розглянутих станцій України, а тривалістю понад 40 днів – лише в Одесі, Сімферополі та Луганську.

Цікавим є порівняння отриманих даних по сучасному періоду з кліматичними характеристиками. В табл. 1.3 по деяких станціях у дужках наведені кліматичні відомості – середня кількість бездошових періодів взята з останнього видання Клімату України [1], а середня та максимальна кількість днів в бездошових періодах отримана з даних, наведених Бучинським І.Є. в [2], які відносяться до періоду 1900-1960 рр. Як можна бачити, порівняно з останнім кліматичним періодом, середня кількість бездошових періодів по станціях змінилася незначно. Найбільші зміни відбулися в Сімферополі – середня кількість бездошових періодів зросла на 0,7, в Одесі – зменшилася на 0,5, в Житомирі – збільшилася на 0,4. В Києві середня кількість не змінилася, по інших пунктах зміни становили лише 0,1-0,2. Середня тривалість бездошових періодів зазнала певних коливань – по 5 станціях з 7 розглянутих станцій вона зросла. В Луганську та Одесі середня тривалість збільшилася майже на 5 та 4 дні відповідно, в Кіровограді та Сумах – на 3 дні, в Києві – на 1,5 дні. Середня тривалість майже не змінилася у Львові та Сімферополі. Щодо максимальної тривалості, то як можна бачити, на всіх станціях показники максимальної тривалості були значно нижче за історичні.

Таблиця 1.3

Показники бездощових періодів по пунктам України за 1995-2012 рр. та кліматичні дані (у дужках)

Тривалість бездощових періодів (кількість днів)	Одеса	Сімферополь	Київ	Харків	Львів	Чернівці	Тернопіль	Кіровоград	Вінниця	Житомир	Ужгород	Суми	Луганськ	Рівно
Середня	16,6 (22)	18,8 (19)	14,5 (16)	15,2	14,2 (14)	14,0	14,4	15,2 (18)	14,8	14,1	14,1	14,0 (17)	15,3 (20)	15,2
Максимальна	43 (88)	55 (93)	31 (64)	30	29 (53)	26	27	32 (83)	35	26	38	25 (81)	50 (84)	37
Середня кількість бездощових періодів	5,8 (5,3)	5,0 (5,7)	3,9 (3,9)	4,5 (4,6)	3,1	3,2 (3,4)	3,2	4,8	4,1	3,2 (3,6)	3,4	4,6	4,9 (5,1)	3,6
Повторюваність по градаціям, %														
10-20 днів	77,1	68,1	82,9	87,1	88,5	93,1	89,7	87,2	87,8	93,1	90,6	91,5	83,3	84,4
21-30 днів	19,0	22,0	15,7	12,9	11,5	6,9	10,3	10,5	9,5	6,9	7,8	8,5	14,3	14,1
31-40 днів	2,9	4,4	1,4	0,0	0,0	0,0	0,0	2,3	2,7	0,0	1,6	0,0	1,2	1,6
41-50 днів	1,0	4,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0
51-60 днів	0,0	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Одержані результати підтверджують дослідження, які виявили, в цілому, несприятливий вплив кліматичних змін у характері регіональної атмосферної циркуляції на режим опадів в Україні наприкінці ХХ – початку ХХІ століття, внаслідок чого опади стали випадати дуже нерівномірно за рахунок збільшенні дискретності у часі та коливання їх інтенсивності (збільшення у червні та зменшення у серпні), при цьому сумарна кількість опадів в теплий період року майже не змінилася [49, 50].

### Висновки до розділу 1

Огляд наукових публікацій показав, що кліматичні умови України є, загалом, сприятливими для утворення різних типів посушливих явищ, які в тій чи іншій мірі відбиваються на стані природного середовища та впливають на сільськогосподарську діяльність. В Україні можуть спостерігатися в будь-який сезон року бездошові періоди, посухи різних видів, суховії.

Моніторинг посух здійснюється за допомогою кількісних показників або індексів, більшість з яких оцінює співвідношення кількості опадів та температурний режим протягом певного проміжку часу в деякому регіоні/пункті. Бездошові періоди як попередники посух, спостерігаються в областях України кожного року, при цьому їх кількість і тривалість незначно змінювалися протягом останніх 50 років.

Розглянуті методики розрахунку п'яти різних індексів посух (гідротермічного коефіцієнту Г.Т. Селянинова, індексу атмосферної посушливості Д.А. Педя, індексу посух Палмера, стандартизованих індексів опадів та опадів-евапотранспірації), а також результати їх застосування в різних географічних регіонах, показали, що всі параметри мають певні обмеження та умовності у визначенні стану та інтенсивності посух, що передбачає попередню перевірку їх репрезентативності в досліджуваних регіонах, з порівняльним аналізом вже апробованих індексів посух.

## РОЗДІЛ 2

КЛІМАТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОСУХ В УКРАЇНІ  
НАПРИКІНЦІ ХХ – ПОЧАТКУ ХХІ СТОЛІТТЯ2.1. Оцінка просторово-часового розподілу посух за допомогою  
гідротермічного коефіцієнту

## 2.1.1. Аналіз полів гідротермічного коефіцієнту

Як вже зазначалося вище, гідротермічний коефіцієнт Г.Т. Селянинова (ГТК) зазвичай обчислюється локально за даними про температуру та опади по мережі метеорологічних станцій, а потім узагальнюється на будь-яку територію. Такий підхід має свої переваги, основна з яких - це першоджерельні вихідні дані спостережень. Але нерегулярність мережі станцій та велика просторово-часова дискретність поля опадів вносять певні похибки в узагальнення інформації про розподіл ГТК по площі виділеного регіону. До того ж, посуха, яка не відноситься до локальних та значно впливає на господарську діяльність цілих географічних регіонів, повинна розглядатись як загальний феномен, що формується під впливом регіональних особливостей полів метеорологічних величин. В такому сенсі є доцільним обчислення гідротермічного коефіцієнту, як і будь-яких інших критеріїв посухи, з використанням полів реаналізу метеорологічних величин високої роздільної якості, яка б забезпечила врахування особливостей розподілу полів температури та опадів на певних територіях.

В дослідженні використані дані реаналізу ERA-interim з кроком регулярної сітки 0,7 градуси: щоденні поля температури повітря на рівні 2 м та інтенсивності опадів. Розрахункова область обмежена координатами  $\varphi = 20,39-45,00^\circ$  пн.ш.,  $\lambda=43,16-54,39^\circ$  сх.д., тобто включала повністю територію України поряд з суміжними регіонами. Вихідні дані отримані та

попередньо оброблені за допомогою засобів веб-порталу Climate Explorer (<http://climexp.knmi.nl>). ERA-Interim є найостаннішою розробкою глобального атмосферного реаналізу від Європейського центру середньострокових прогнозів погоди (ECMWF), архів даних покриває період з 1 січня 1979 р. по поточний день.

Для оцінки ступеня вірогідності даних ERA-Interim щодо реальних часових рядів температури і опадів, був виконаний кореляційний аналіз між рядами добової температури і інтенсивності опадів по восьми станціях України та відповідними метеорологічними величинами з полів реаналізу. Ця процедура здійснювалася за допомогою Climate Explorer, при цьому станційні дані по опадах та температурі обиралися з бази даних ECA&D, а сіткові дані реаналізу осереднювалися в квадраті зі стороною, що дорівнювала одному кроку сітки (0,7 градусів), в який попадали координати певної станції. Розглядався період з 1 січня 1979 р. по 31 грудня 2012 р. Узагальнені по місяцях коефіцієнти кореляції ( $r$ ) представлені на рис. 2.1. Як можна бачити, для температури повітря тіснота кореляційного зв'язку є вельми високою, особливо в холодне півріччя (рис. 2.1, а). Для Києва, Львова, Вінниці та Кіровограду коефіцієнт кореляції коливається в межах 0,97-0,99, трохи знижуючись в літні місяці. На інших станціях кореляційний зв'язок більш слабкий, але загалом не нижчий 0,85. Найгірші результати спостерігаються для Луганська, а мінімальні значення  $r$  припадають на квітень-травень.

По опадах кореляційний зв'язок менш тісний (рис. 2.1, б), що відповідає складності відтворення просторово-часової структури полів опадів в реаналізі. По більшості станцій, окрім Сімферополя, коефіцієнт кореляції має певний річний хід з основним максимумом в лютому або березні ( $r = 0,64-0,72$ ) та вторинним максимумом у вересні, мінімум доводиться на липень-серпень ( $r = 0,45-0,58$ ). Найвищі коефіцієнти кореляції спостерігаються для Києва, Львова, Вінниці, найнижчі для Одеси та Сімферополя, де режим опадів є складнішим через близькість акваторії моря. Отримані коефіцієнти

кореляції для температури та опадів є значущими (для 5% рівня значущості), що дозволяє використовувати дані ERA-Interim для подальших розрахунків.

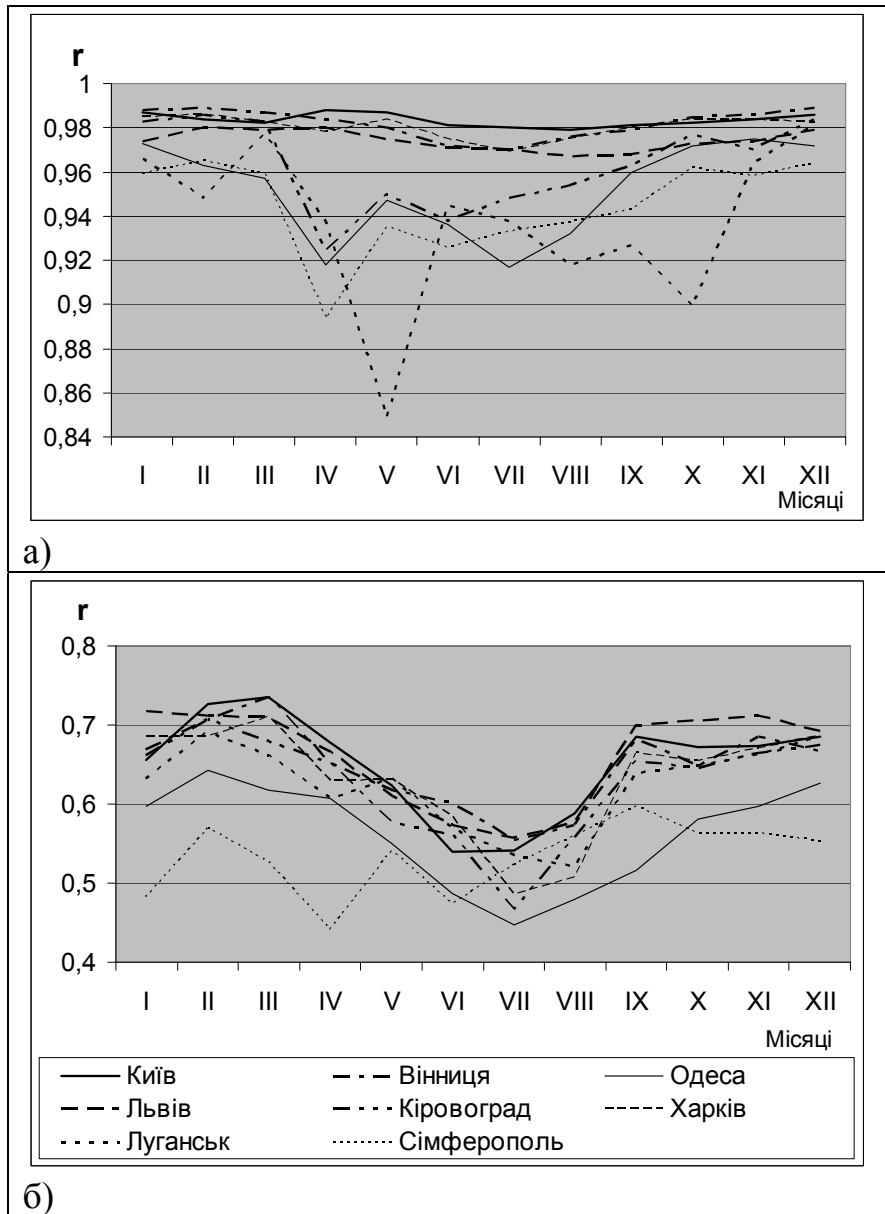


Рис. 2.1. Розподіл по місяцях коефіцієнту кореляції між даними станційних спостережень і даними ERA-Interim по температурі повітря (а) та інтенсивності опадів (б)

Гідротермічний коефіцієнт розраховувався за формулою (1.1) згідно методики Г.Т. Селянинова за вегетаційний період з середньодобовими температурами від  $+10^{\circ}\text{C}$ . До розгляду були взяті відповідні поля температури повітря та опадів за квітень-жовтень 1995-2012 р. При цьому місячні суми температур були одразу обчислені за допомогою Climate Explorer за травень-

вересень, адже в ці місяці середньодобові температури на території України, за виключенням гірських районів та окремих діб, перевищують +10 °С. Дещо ускладненим був розрахунок сум температур в перехідні місяці квітень та жовтень. В даному випадку з бази даних були вибрані середньопентадні температури за 6 пентад в кожному місяці та визначені пентади з середньою температурою від +10 °С в кожній точці розрахункової області. В ці пентади були обчислені суми температур та відповідні суми опадів, які в подальшому використані для розрахунку пентадних значень ГТК. Місячні значення ГТК для квітня та жовтня визначалися шляхом осереднення пентадних значень, для інших місяців ГТК обчислювався безпосередньо за місячними сумами температур та опадів.

Для визначення найбільш ймовірних полів ГТК серед сезонних та місячних, був застосований підхід оцінки полів за їх якісними характеристиками за допомогою критеріїв аналогічності. В якості критерію, який характеризує геометричну схожість двох полів метеорологічних величин за розподілом аномалій, обраний критерій М.А. Багрова [51-53]:

$$\rho = \frac{n_+ - n_-}{n_+ + n_-}, \quad (2.1)$$

де  $n_+$  - кількість вузлів сітки, де знаки аномалій полів збігаються;

$n_-$  - кількість вузлів сітки, де знаки аномалій полів не співпадають.

В даному дослідженні аномалії полів визначалися як різниця між середнім значенням змінної по полю та значенням змінної в кожному вузлі сітки. Параметр  $\rho$  є близьким до коефіцієнту кореляції і також коливається в межах від -1 до +1.

Для оцінки близькості полів використовувався параметр  $\eta$ , який є пропорційним квадрату відстані між двома полями [54-55]:



$$\eta = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (x_{im} - x_{in})^2}, \quad (2.2)$$

де  $K$  – кількість вузлів в області розрахунку;

$x_{im}$  та  $x_{in}$  – значення метеорологічної величини в  $i$ -му вузлі  $m$ -го та  $n$ -го полів.

Основним критерієм у визначенні аналогічності між полями виступав параметр  $\rho$ , параметр  $\eta$  використовувався як додатковий критерій.

По розрахунках  $\rho$  та  $\eta$  будувалися матриці цих величин для визначення аналогічності сезонних та місячних полів ГТК. Аналіз цих матриць зводився до визначення року з найбільш високим середнім значенням  $\rho$ , що вказує на найбільш ймовірне та інформативне поле у виборці. Згідно [55], поля, для яких виконуються умови  $\rho \geq 0,5$  та  $\eta \leq 1,0$ , є аналогами та відносяться до одного класу. Поля з низьким значенням  $\rho$  ( $\leq 0,3$ ) відносяться до іншого класу і, як правило, складають групу аномальних та рідкісних процесів.

Розглянемо особливості сезонного розподілу ГТК на території України, використовуючи визначені найбільш та найменш інформативні поля [56].

**Сезонні поля ГТК.** Аналіз матриці  $\rho$ , побудованої на порівнянні осереднених за кожний сезон (квітень-жовтень) 1995-2012 рр. полях гідротермічного коефіцієнту, показав належність всіх полів до одного класу,  $\rho$  коливався від 0,41 до 0,64. Найбільш ймовірним визначено поле ГТК за 2012 рік ( $\rho = 0,64$ ,  $\eta = 0,44$ ), представлене на рис. 2.2, а. Основні елементи сезонного поля ГТК по області розрахунку містять два стійких осередки аномалій підвищених значень коефіцієнту, пов'язаних з гірськими системами. Один осередок в південно-східній частині області, що зберігається протягом всього сезону та простежується на всіх подальших полях, пов'язаний з Кавказьким хребтом. Другий осередок в західній частині в межах території України відповідає Карпатському регіону, але на відміну від Кавказу, є досить мінливим протягом розглянутих сезонів.

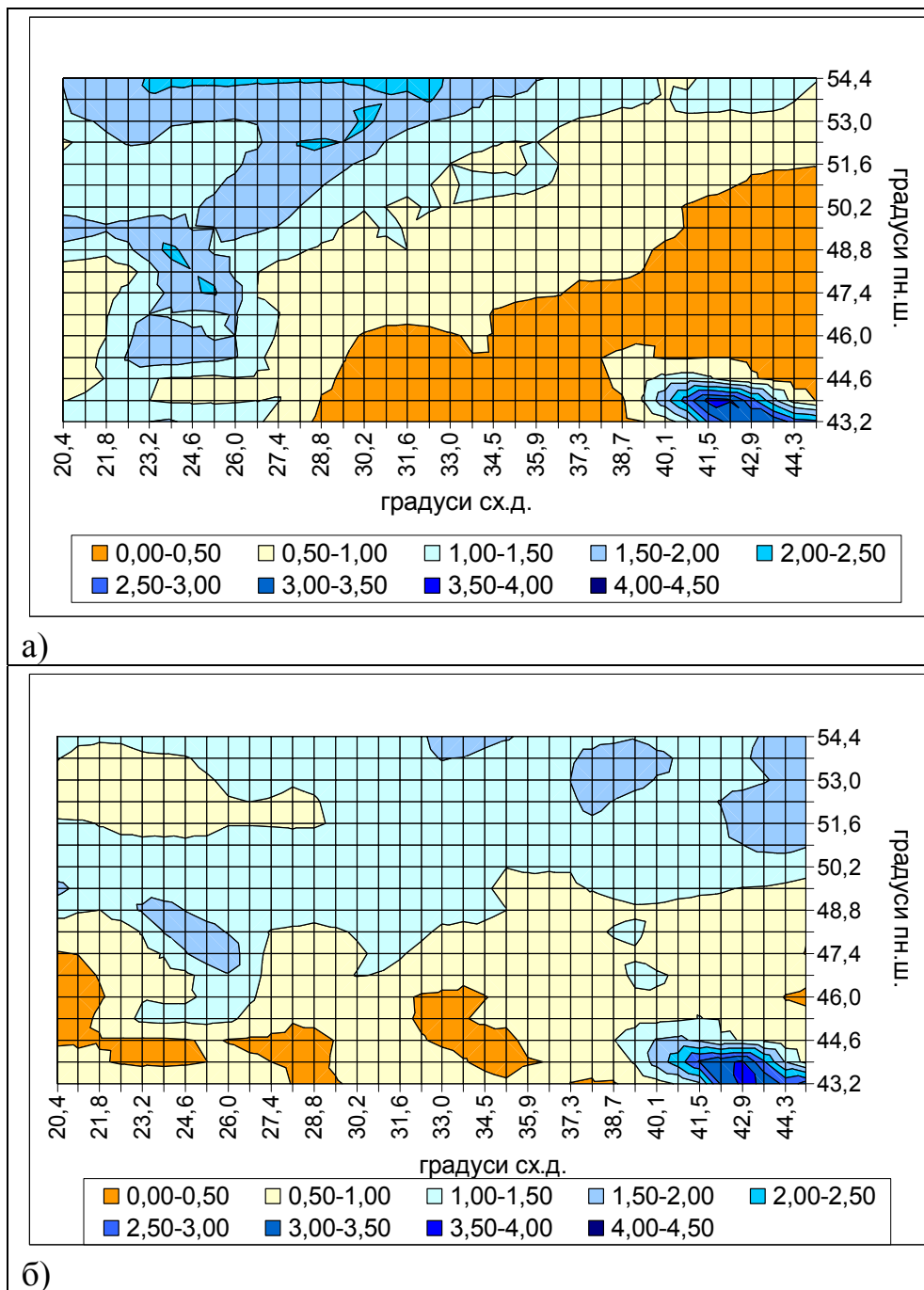


Рис. 2.2. Сезонні поля ГТК: а) за 2012 р. (найбільш ймовірне);  
б) за 2000 р. (найменш ймовірне)

Основною рисою поля є квазіширотна спрямованість значень ГТК в межах України - вони зменшуються з північного заходу та півночі на південь та південний схід. Найнижчі показники ГТК ( $< 0,5$ ) протягом теплого сезону спостерігаються в південних областях, Криму та Приазов'ї, що свідчить про майже щорічний характер настання сухих періодів в степових та приморських

районах. В центральних та східних областях країни теплий сезон помірно посушливий з  $0,5 < ГТК < 1,0$ .

Прикарпатські райони і північні області знаходяться в зоні достатньої зволоженості протягом теплого сезону, тому посушливі явища повинні мати меншу тривалість та інтенсивність, яка не відбилася у сезонному полі.

Стосовно суміжних з Україною територій можна бачити, що наростання інтенсивності посушливих явищ відбувається на схід в районах Нижнього Поволжжя. Більш зволеними є сектор на північному заході (Польща та Білорусь). На захід від Карпат над Угорщиною поле ГТК також відбиває переважання посушливих сезонів.

Найменш ймовірним в розглянутій вибірці виявилось поле ГТК теплого сезону 2000 року ( $\rho = 0,41$ ;  $\eta = 0,49$ ). Основними відмінностями в ньому виступає однорідний розподіл ГТК по території України з слабо вираженим осередком підвищених значень в районі Карпат (рис. 2.2, б). Більша частина областей відмічена помірно посушливим сезоном, посуха спостерігалася на обмеженій території Херсонської області та в Криму. В цьому полі є суттєві відмінності й розподілу ГТК на сусідніх територіях. Найменші значення коефіцієнту охоплюють майже всю західну та північно-західну частину, що свідчить про переважання посушливих умов, незвичних для цих районів. Навпаки, в звичайно посушливих приволзьких районах режим зволоженості того сезону був високим, без тривалих сухих періодів, які б відобразилися на сезонному полі ГТК.

**Поле ГТК у квітні.** Просторовий розподіл ГТК у перехідні сезони, як вже зазначалося вище, має складний характер внаслідок неодночасного настання періоду з добовими температурами від  $+10$  °С по площі розрахунку. Через це в деяких точках поля ГТК не міг бути розрахований в певних роках, тому для аналізу просторового розподілу в квітні, а також жовтні, було обчислено осереднене поле по всім наявним даним в кожній точці. Методика підбору аналогів за критеріями (2.1)-(2.2) також не може бути застосована для полів з неоднаковою кількістю вузлів, тому для перехідних місяців

обмежимося спрощеним аналізом з метою визначення найбільш ймовірних та аномальних полів. Найменша кількість значень ГТК, що бралася для розрахунку середнього поля, спостерігалася в гірських районах та на широтах північніше за 50° пн.ш., тобто в районах з передумовно низькою середньою температурою повітря. Найбільш повна інформація зосереджена у вузлах в центральній та південній частинах області розрахунку.

Представлене на рис. 2.3, а осереднене поле ГТК за квітень має основні риси сезонного розподілу параметру. Осередки підвищених значень ГТК пов'язані з Карпатами та Кавказом. На решті території поле досить однорідне, причому ГТК коливається межах 0,5-1,0, відповідаючи помірно посушливим умовам, і лише на крайньому півдні країни значення ГТК стають меншими за 0,5, вказуючи на наявність посух в окремі періоди. Слід зазначити, що малі значення ГТК відображують той факт, що навесні нетривалі теплі періоди, як правило, бувають малоохмарними та без суттєвих опадів, що сприяє швидкому прогріву повітря і підвищенню середньодобової температури протягом окремих пентад.

Середня кількість пентад по області розрахунку, що використовувалася в кожному місяці, може дати картину повторюваності холодних та теплих квітнів по розглянутих роках. Так, в чотирьох роках середня кількість пентад не перевищувала 1,7, тобто в значній кількості точок сітки інформація для розрахунку була відсутня протягом місяця, оскільки пентадні значення не перевищували +10 °С. Такі холодні квітні спостерігалися в 1996, 1997 (найхолодніший), 2003 та 2007 рр. Найбільш теплими виявилися квітні 2000, 2008 (найтепліший) та 2012 рр., в яких середнє значення розрахункових пентад перевищило 4, тобто в більшості точок поля інформація була присутня майже протягом всього місяця.

У 8 роках (1995, 2002, 2004, 2005, 2006, 2010-2012 рр.) розподіл ГТК по площі відповідав середньому полю, тобто квітень в цих роках був помірно теплим та сухим.

В 2000 та 2001 рр. квітень виявився вологим і доволі теплим, розподіл ГТК суттєво відрізнявся від середнього поля, що виділяє ці поля як аномальні для цього місяця (рис. 2.3, б).

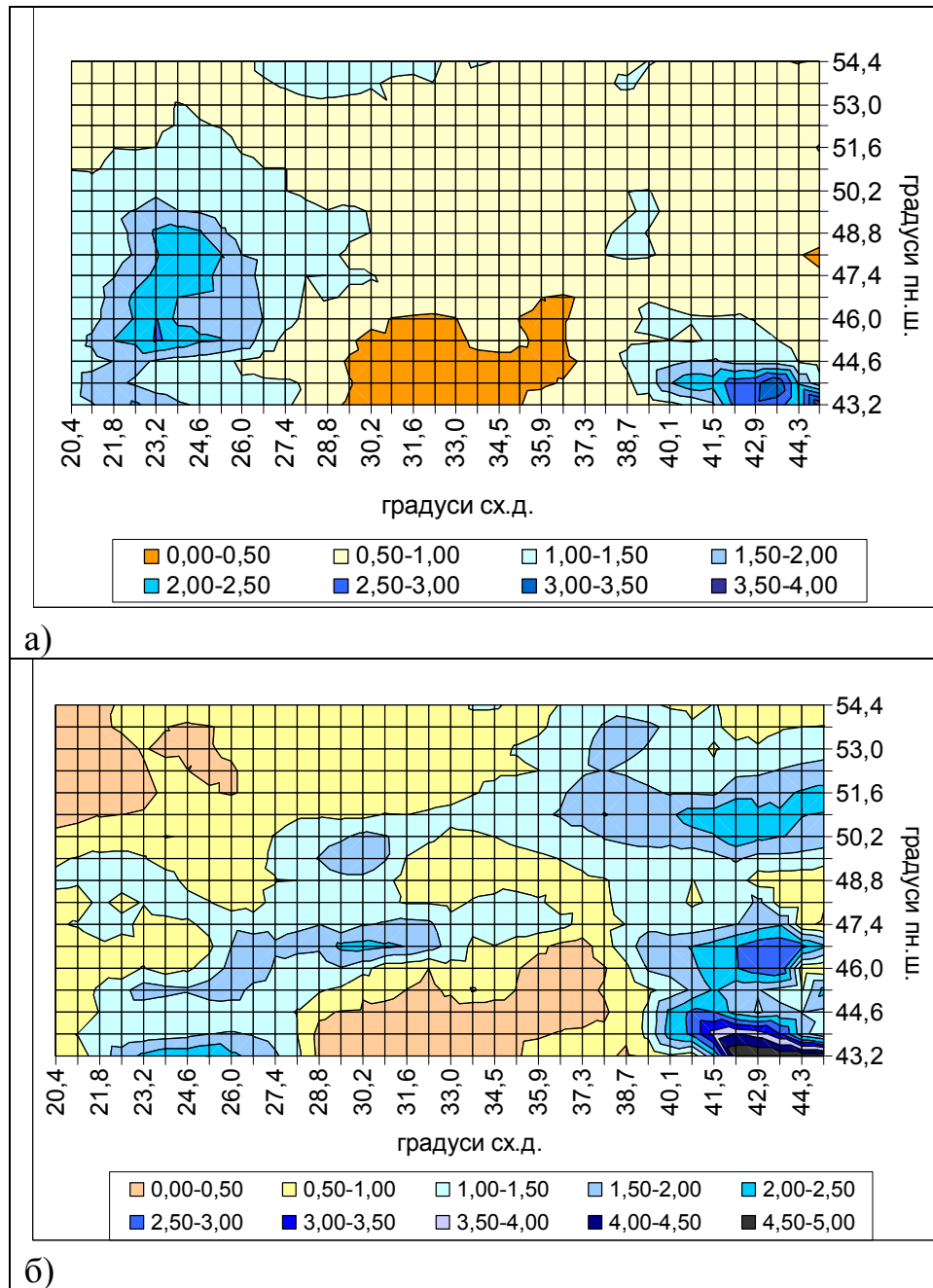


Рис. 2.3. Осереднене поле ГТК за квітень 1995-2012 рр. (а) та поле ГТК за квітень 2000 р (б)

**Поле ГТК у травні.** Аналіз критеріїв  $\rho$  та  $\eta$  для травневих полів ГТК показав, що більшість з них відносяться до одного класу, для якого найбільш

ймовірним є поле ГТК за травень 1996 р. ( $\rho = 0,49$ ;  $\eta = 0,84$ ), представлене на рис. 2.4, а.

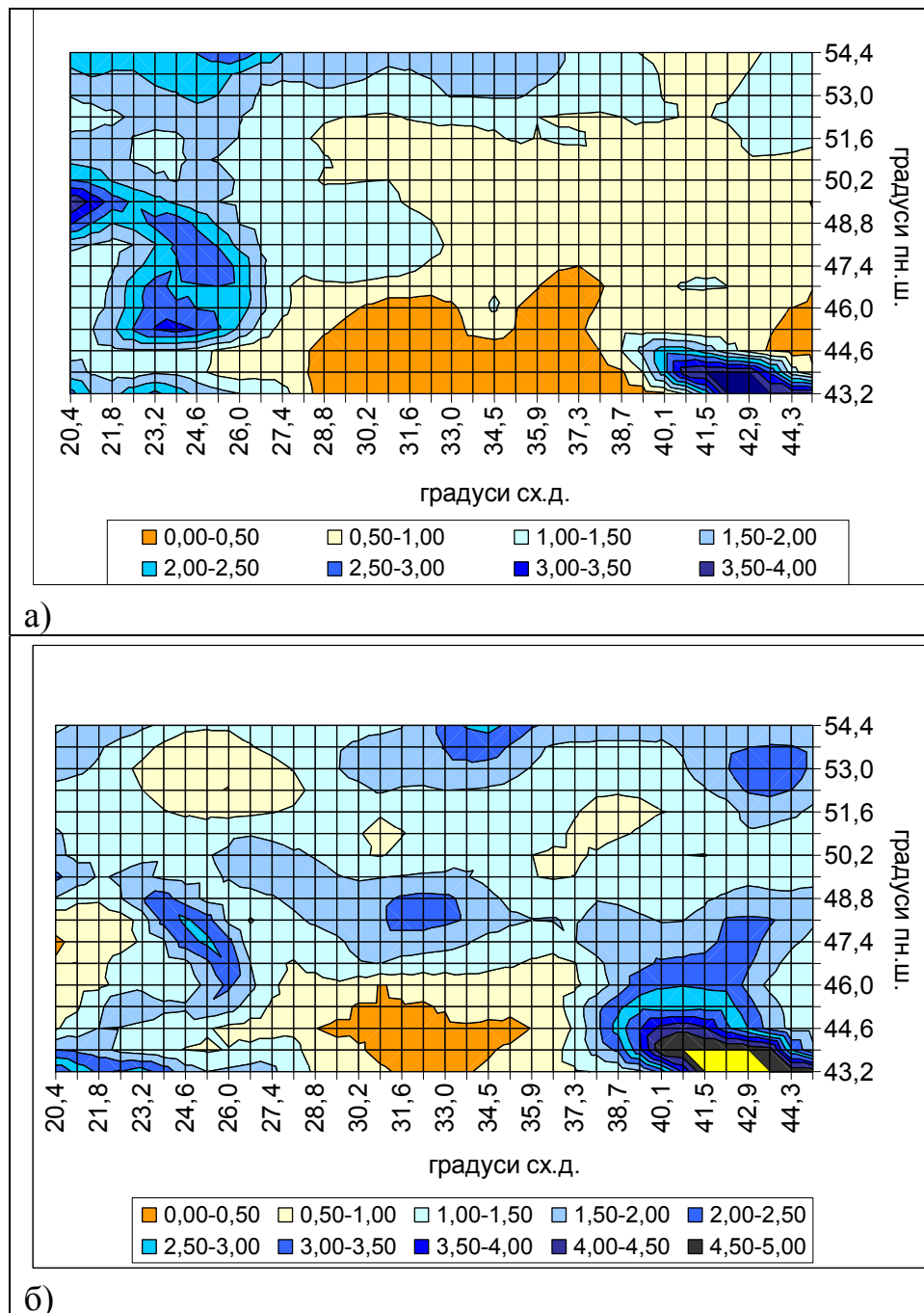


Рис. 2.4. Поля ГТК в травні: а) за 1996 р. (найбільш ймовірне); б) за 2001 р. (найменш ймовірне)

Основними особливостями розподілу ГТК є високі значення параметру в західній частині України з максимумом в Карпатах і Прикарпатті, та

посушливі умови на решті території країни. ГТК  $< 0,5$  в південних областях вказує на звичайність травневої посухи в цьому регіоні.

До другого класу віднесені два поля ГТК за травень 2000 та 2001 рр. ( $\rho$  відповідно дорівнює 0,23 та 0,25), які в даному періоді були найменш повторюваними і характеризувалися підвищеними значеннями ГТК в більшості областей України, за винятком крайніх південних районів (рис. 2.3, б).

**Поле ГТК у червні.** Як і в травні, у червні більшість полів ГТК відносяться до одного класу, для якого найбільш ймовірним є поле за червень 2012 р. ( $\rho = 0,47$ ;  $\eta = 0,90$ ), представлене на рис. 2.5, а. Це поле за характером розташування осередків високих значень ГТК та квазіширотним розподілом близько до сезонного (див. рис. 2.2, а). Зона високого зволоження зосереджена в Карпатах та Прикарпатті. На схід від гірських районів ГТК швидко зменшується і на більшій частині України становить до 0,5, в північних областях до 1,0-1,5.

До другого класу відносяться поля ГТК за два роки - 2000 та 2003, для яких  $\rho$  дорівнює відповідно 0,20 та 0,27. В найменш ймовірних полях за червень осередок підвищених значень ГТК розташований на північному сході області дослідження, а помірно посушливі умови спостерігаються на всій території України, в меншій мірі в 2000 р. (рис. 2.5, б) та більш інтенсивні в 2003 р.

**Поле ГТК у липні.** У липні поля ГТК стають більш однорідними і за параметром  $\rho$  всі відносяться до одного класу, для якого найбільш ймовірним є поле за липень 2001 р. ( $\rho = 0,63$ ;  $\eta = 0,78$ ), представлене на рис. 2.6. Як і в червні, це поле за конфігурацією основних осередків близьке до сезонного, але відрізняється меншою площею значень ГТК, які відповідають посусі в південних та південно-східних областях України. Західні та північно-західні райони в липні знаходяться в зоні високої зволоженості, з максимумом ГТК в Карпатах.

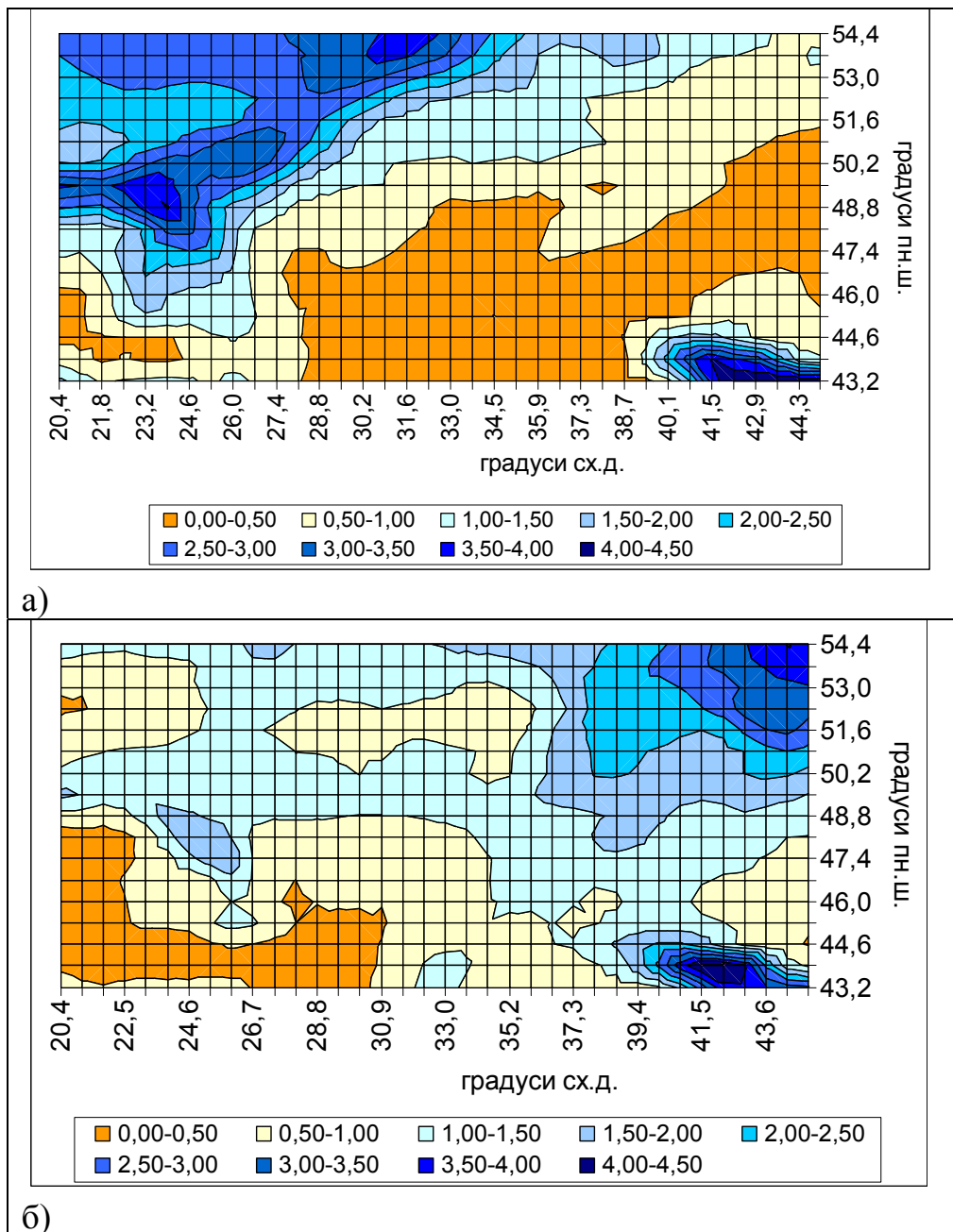


Рис. 2.5. Поля ГТК в червні: а) за 2012 р. (найбільш ймовірне); б) за 2000 р. (найменш ймовірне)

**Поле ГТК у серпні.** У серпні збільшується різноманітність полів ГТК, що виражається у загальному зменшенні параметру  $\rho$  та наявності двох класів, менш повторюваних з яких складається з чотирьох полів (1997, 2000, 2002 і 2003 рр.). В основному класі найбільш ймовірним є поле за серпень 2008 р. ( $\rho = 0,54$ ;  $\eta = 0,64$ ), представлене на рис. 2.7, а. Основною рисою цього поля є його просторова однорідність за рахунок суттєвого зменшення



значень ГТК, порівняно з попередніми місяцями, в західній частині України. Тобто, в серпні посуха спостерігається на більшій частині території країни, за виключенням Карпатського регіону та північно-західних областей, де умови помірно посушливі.

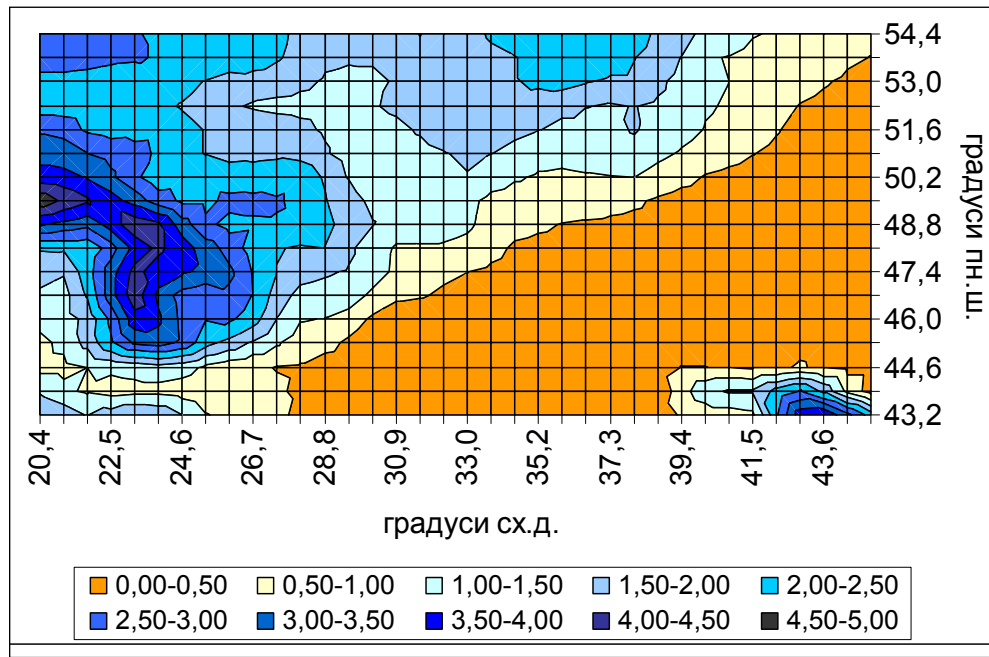


Рис. 2.6. Поле ГТК за липень 2001 р. (найбільш ймовірне)

До другого класу увійшли роки з аномальним для серпня рівнем зволоженості, завдяки чому характер просторового розподілу ГТК значно відрізняється від найбільш ймовірного поля. На рис. 2.7, б представлено поле ГТК за серпень 1997 р. при мінімальному по виборці  $\rho = 0,11$ . Просторовий розподіл ГТК характеризується підвищеними значеннями параметру на більшій частині території України з максимумом в Карпатах. При цьому на північ та схід значення ГТК зменшуються до посушливих умов.

**Поле ГТК у вересні.** Просторовий розподіл ГТК у вересні відрізняється значною мінливістю рік від року, про що свідчать невеликі значення критерію  $\rho$ , що ускладнює відбір найбільш ймовірного поля для цього місяця. До першого класу увійшли вісім років, а найбільш ймовірним виявилось поле ГТК у вересні 2012 р. ( $\rho = 0,39$ ;  $\eta = 0,71$ ), представлено на рис. 2.8, а.

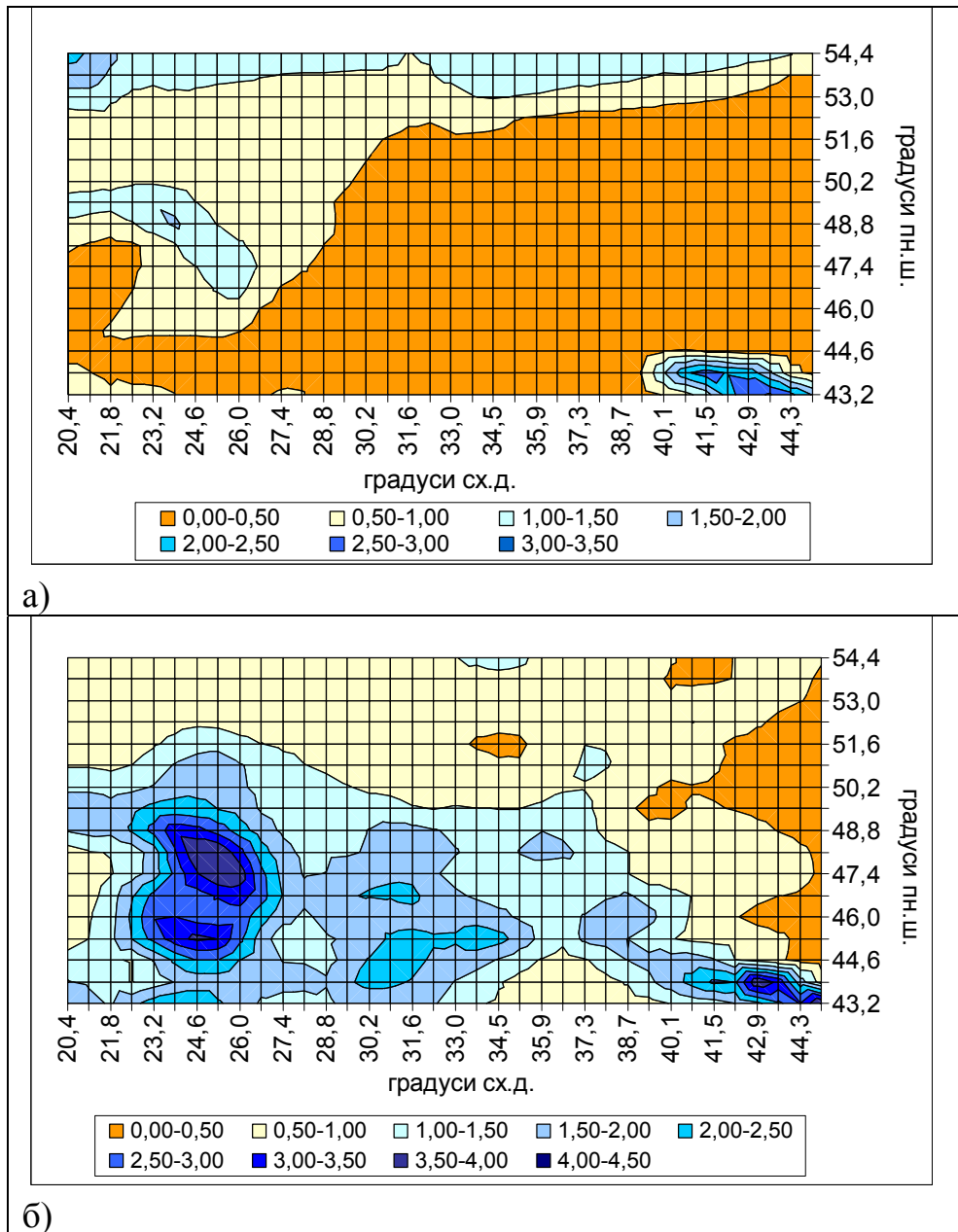


Рис. 2.7. Поля ГТК у серпні: а) за 2008 р. (найбільш ймовірне); б) за 1997 р. (найменш ймовірне)

Аналогічно розподілу ГТК в серпні, у вересні територія України знаходиться в умовах посухи, за виключенням Карпат та Прикарпаття. В типовому полі спостерігається встановлення зональності в розподілі ГТК в зв'язку з сезонним збільшенням опадів в північних від України широтах.

Оскільки до другого класу за параметром  $\rho$  увійшло більше половини всіх досліджуваних років, для цієї групи проведено більш детальний аналіз з метою виявлення особливостей менш повторюваних ситуацій.

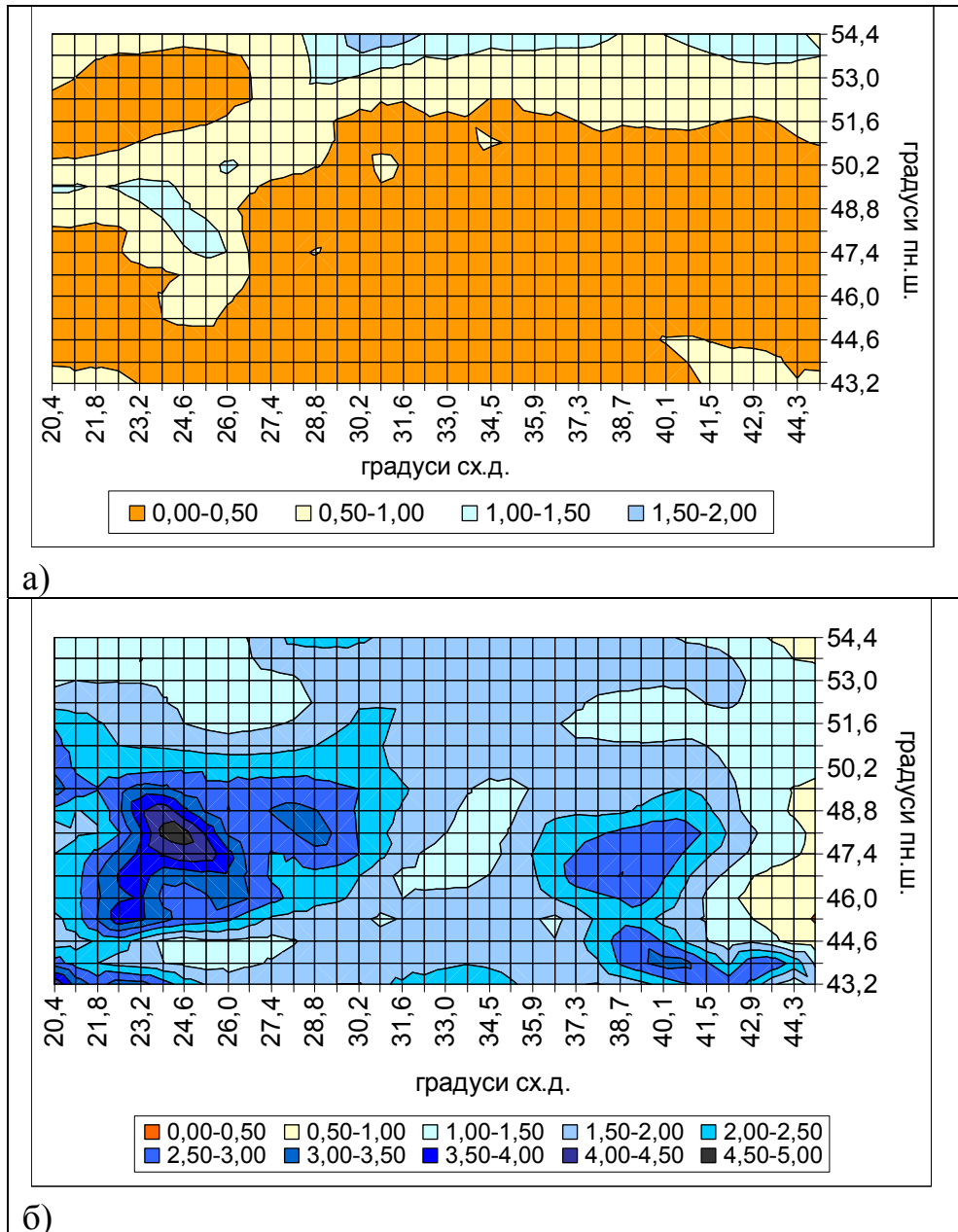


Рис. 2.8. Поля ГТК у вересні: а) за 2012 р. (найбільш ймовірне); б) за 1996 р. (найменш ймовірне)

До аномальних випадків за конфігурацією поля відноситься вересень 1996 р. ( $\rho = 0,18$ ;  $\eta = 1,23$ ) завдяки підвищеним значенням ГТК по всій області розрахунку (понад 1,5), що свідчить про високий рівень опадів в цьому місяці (рис. 2.8, б). Інші випадки другого класу можна об'єднати в 3 групи за особливостями конфігурації полів ГТК, приклади яких наведені у Додатку Б.

До першої групи увійшли поля з наявністю великого осередку підвищених значень ГТК в західній половині України, такі ситуації спостерігалися в 2001 та 2008 роках. До другої групи відносяться поля ГТК з переважанням посушливих умов по території України, в тому числі в Карпатському регіоні. Цю групу складають вересні 2003, 2005, 2006, 2009 та 2011 років, останній з яких є найбільш екстремальним в цій групі по площі розповсюдження ГТК  $\leq 0,5$ . До третьої групи віднесені два вересні 2000 та 2002 років, які характеризуються незвичайною смугою підвищених значень ГТК, орієнтованою з південного заходу на північний схід, яка займає більшу площу території країни. Райони з посушливими умовами зосереджені на крайньому півдні та південному сході.

**Поле ГТК у жовтні.** Як і для квітня, поля ГТК у жовтні кожного року розраховувалися щопентадно в залежності від виконання умови середньої температури  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  в кожній точці розрахункової сітки. Середня кількість пентад для розрахунку в жовтні становила 2,5, а максимальна, на відміну від квітня, не перевищила 3,7. Тобто, дати зниження температури восени рік від року коливаються менше, ніж дати прогріву навесні для встановленого критерію. Найбільш холодними виявилися жовтні 2010 та 2011 рр. з середньою кількістю пентад 1,10 та 1,98 відповідно. Найбільш теплими були жовтні 1995, 2006, 2008 та 2012 рр., в яких середня кількість пентад перевищила три, з максимумом в 2012 р.

Побудоване за всіма наявними даними в точках сітки середнє поле ГТК представлене на рис. 2.9, а. Можна бачити, що в середньому, південна половина території України в жовтні перебуває в зоні помірної посушливості (ГТК від 0,5 до 1,0), інша частина в зоні достатнього зволоження при ГТК  $> 1,0$ . Районів з посухою в середньому полі не виявляється.

На відміну від весняних місяців, коли центр посушливих явищ зосереджений на півдні, в жовтні в багатьох роках більш посушливими виявляються центральні та північні, а іноді й західні райони України, що можна пояснити активізацією циклонічної діяльності в Середземноморському

басейні та збільшенням кількості опадів в зв'язку з переміщенням південних циклонів.

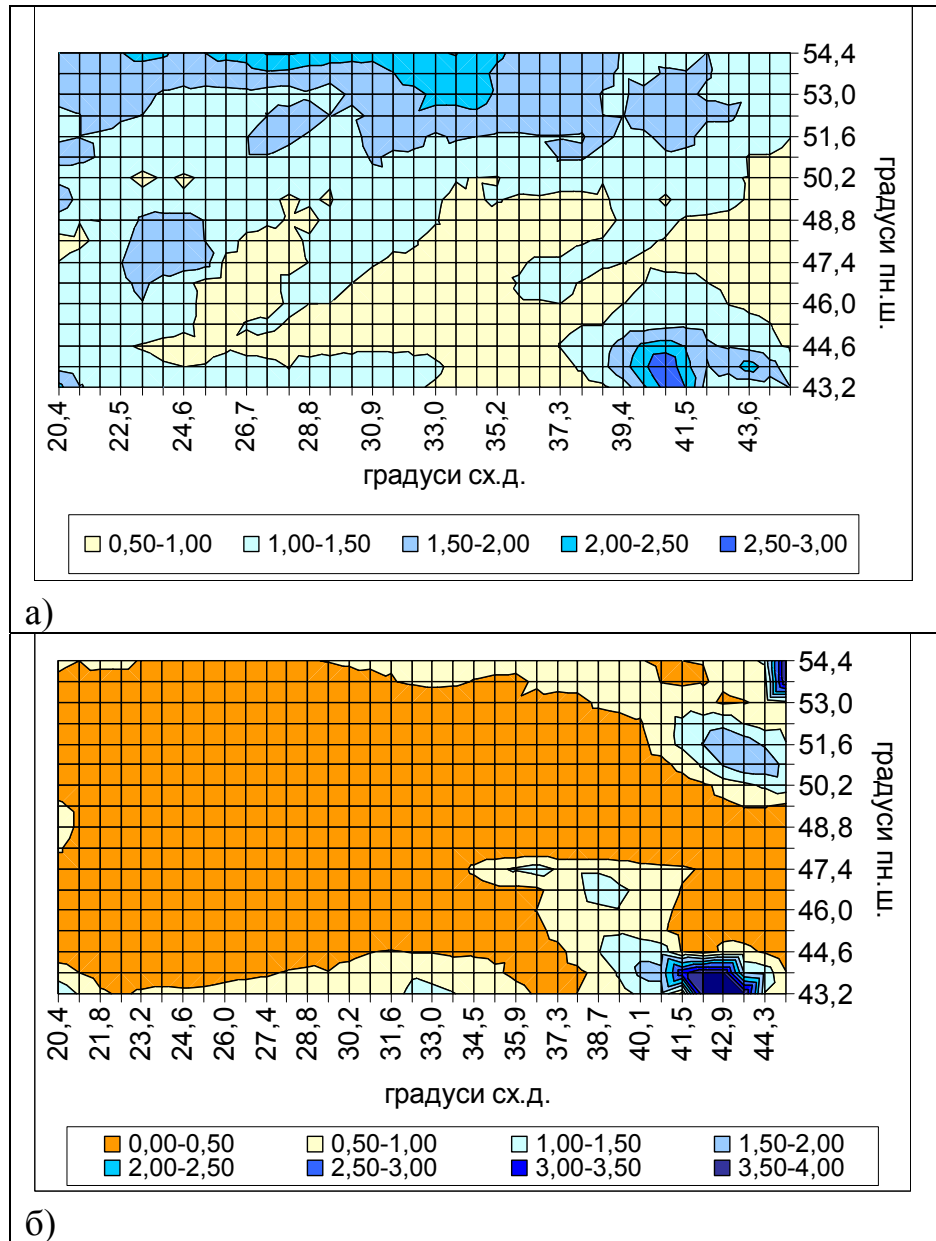


Рис. 2.9. Поля ГТК в жовтні: а) середнє за 1995-2012 рр.;  
б) за 2000 р. (аномальна посушливість)

Оскільки в цілому поля ГТК в жовтні є досить різноманітними через відсутність даних в деяких точках та загальне ускладнення температурно-вологісного режиму по території, дамо огляд найбільш повних полів, що значно відрізняються від середнього за жовтень. Так, в 2000 та 2001 рр.

жовтень відрізнявся аномальним розповсюдженням посухи по всій території, яка спостерігалася від 2 до 5 пентад в залежності від широти міста (рис. 2.9, б). В жовтні 2005 р. посушливі умови охоплювали переважно західну та північну частину України, тоді як в східній половині режим зволоження був високим. В жовтні 1995 р. посушливі умови спостерігалися в західних, центральних областях та на півдні, тоді як в північно-західній частині і на сході країни сформувалися осередки підвищеної зволоженості. В жовтні 2008 р., який був доволі теплим по всій території країни, структура поля ГТК була аналогічною літнім місяцям, з максимумом ГТК в Карпатському регіоні та посушливими умовами на решті території України.

**Повторюваність посушливих умов різної інтенсивності.** Розглянемо просторовий розподіл посушливих умов різної інтенсивності за допомогою виділення повторюваності значень ГТК встановлених критеріїв. На рис. 2.10 представлені поля сумарної сезонної повторюваності ГТК в межах значень 0,0 – 1,5, які відповідають різному ступеню посушливості /зволоженості.

Згідно просторового розподілу повторюваності ГТК  $\leq 1,5$ , на більшій частині території України понад 80% місяців теплого сезону є відносно сухими (рис. 2.10, а). Повторюваність критерію зменшується на північний захід та захід, досягаючи мінімуму (20-40%) в Карпатах, який зберігається для всіх полів. При ГТК  $\leq 1,0$  площа з повторюваністю критерію понад 80% значно скорочується, займаючи південні області України, для яких протягом майже всього сезону притаманно переважання посушливих місяців (рис. 2.10, б). 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 (рис. 2.10, г).

Межа з 50% повторюваністю посух проходить приблизно через 47° пн.ш., охоплюючи південні і центральні області. На заході та півночі

України повторюваність посух значно зменшується, не перевищуючи 20-30%. Нарешті, 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 (рис. 2.10, г).

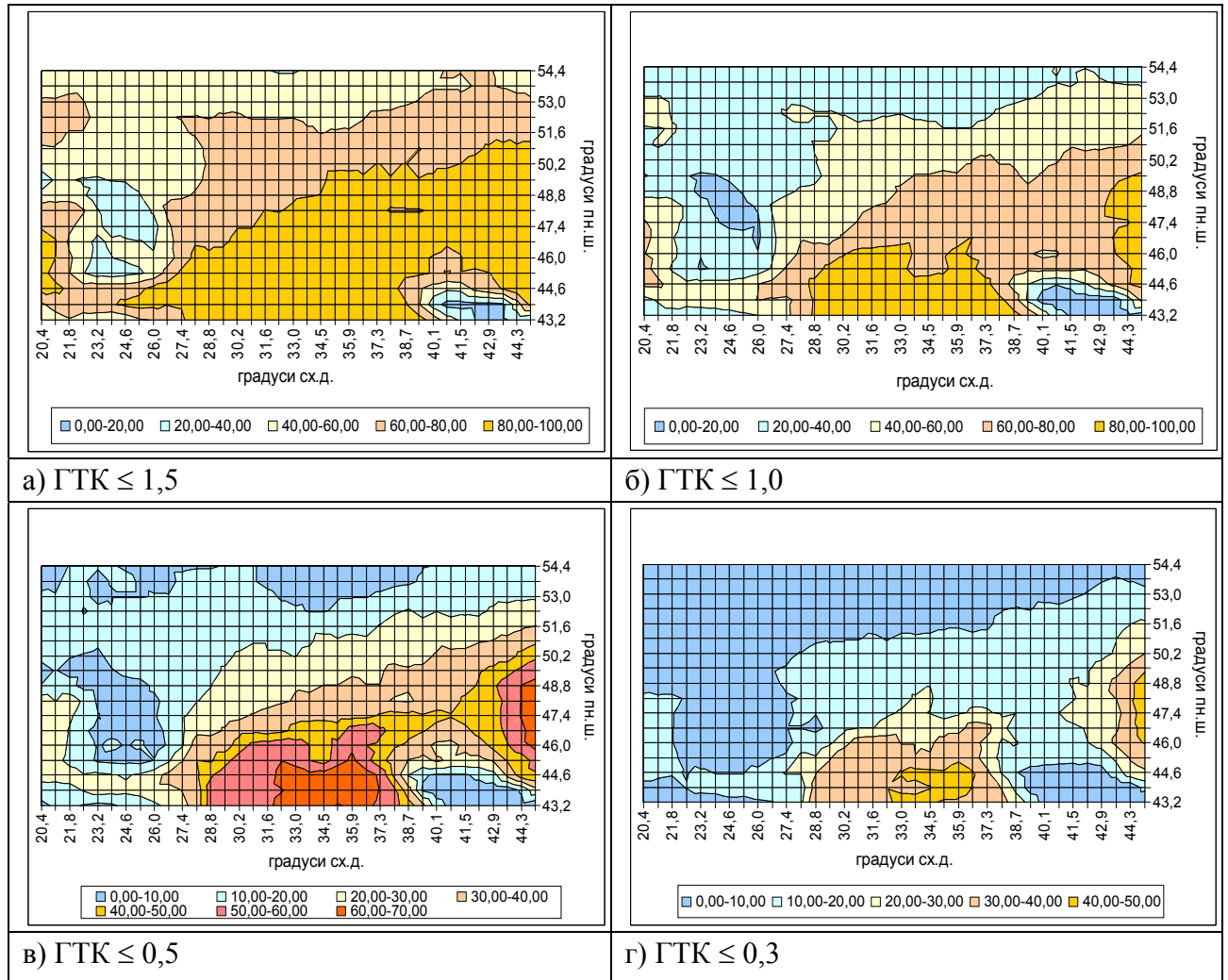


Рис. 2.10. Поля повторюваності різних критеріїв ГТК (%) за теплі сезони 1995-2012 рр.

### 2.1.2. Аналіз просторово-часового розподілу гідротермічного коефіцієнту

Висока роздільна здатність вихідної інформації, яка використовувалася для розрахунку ГТК, дозволила провести осереднення по агрокліматичним зонам України з метою визначення сезонних та місячних показників протягом

періоду, що розглядається. Області осереднення відповідно до розташування агрокліматичних зон представлені у Додатку В.

Представлені у табл. 2.1 розраховані середні значення ГТК показують, що найменші середньосезонні показники цього параметру (нижче 1,0) спостерігаються в АР Крим та степовій зоні і коливаються в межах 0,56-0,88. В АР Крим ГТК змінювався від 0,25 у 2007 р. до 0,87 у 1997 р., тобто в усі роки цій зоні притаманна посушливість від помірної до сильної.

Таблиця 2.1

Середні значення ГТК по агрокліматичним зонам України за теплі сезони 1995-2012 рр.

Рік	Полісся	Лісостеп	Північний Степ	Південний Степ	АР Крим	Карпати	Прикарпаття	Закарпаття	Середнє за сезон
1995	1,40	1,31	0,93	0,72	0,61	1,91	1,76	2,45	1,39
1996	1,33	1,06	0,78	0,69	0,66	1,88	1,73	1,89	1,25
1997	1,62	1,48	1,38	1,16	0,87	2,14	1,85	1,84	1,54
1998	1,59	1,22	0,64	0,60	0,60	2,53	2,04	2,07	1,41
1999	1,21	0,84	0,85	0,75	0,72	2,03	1,66	1,99	1,26
2000	1,09	1,12	0,94	0,72	0,47	1,18	1,28	0,79	0,95
2001	1,48	1,27	0,97	0,75	0,53	2,33	2,04	2,57	1,49
2002	1,19	1,05	0,85	0,67	0,69	2,19	1,70	2,25	1,32
2003	1,57	1,25	0,74	0,57	0,44	2,26	1,93	1,97	1,34
2004	1,17	1,11	1,16	1,05	0,63	1,89	1,60	1,91	1,32
2005	1,03	0,83	0,72	0,53	0,35	2,28	2,04	2,60	1,30
2006	1,39	1,04	0,81	0,70	0,62	2,29	2,01	2,15	1,38
2007	1,09	0,68	0,52	0,36	0,25	1,82	1,73	1,50	0,99
2008	1,33	1,12	0,97	0,77	0,44	2,15	2,39	2,04	1,40
2009	1,37	0,76	0,82	0,60	0,30	1,43	1,15	1,26	0,96
2010	1,29	0,97	1,32	1,06	0,81	2,57	2,46	2,50	1,62
2011	1,18	1,03	0,76	0,70	0,68	1,27	1,17	1,30	1,01
2012	1,34	0,89	0,62	0,47	0,35	1,52	1,43	1,50	1,02
Середнє по зоні	1,32	1,06	0,88	0,72	0,56	1,98	1,78	1,92	1,27

В південному Степу ГТК змінювався від 0,36 у 2007 р. до 1,16 у 1997 р., в північному Степу екстремуми ГТК 0,52 та 1,38 спостерігалися в ті ж самі роки. Загалом, середньосезонні значення ГТК були нижче ніж 1,0, за



виключенням 1997, 2004 та 2010 рр. В Лісостепу середній ГТК перевищує 1,0, а посушливими були шість сезонів: 1999, 2005, 2007, 2009, 2010 та 2012 рр. В Поліссі середній ГТК підвищується до 1,32, і протягом розглянутого періоду ця зона перебувала у відносно вологих умовах при коливанні параметру від 1,03 (в 2005 р.) до 1,62 (в 1997 р.). Карпатський регіон відрізняється загалом підвищеними значеннями ГТК порівняно з іншими зонами в усіх роках, з меншими показниками в Прикарпатті та найвищими в гірській частині Карпат. Найнижчі значення ГТК звичайно спостерігалися в роки із поширеними посухами в країні, в Закарпатті виділяється також 2000 р. з ГТК, що дорівнює 0,79. Але в цілому, середні значення ГТК відповідають добрим умовам зволоження цього регіону. Найбільш посушливими по Україні, загалом, були теплі сезони 2000, 2007 та 2009 рр.

Аналіз змін ГТК протягом місяців теплого сезону показав (табл. 2.2), що найнижчі значення спостерігаються по всіх зонах наприкінці літа – початку осені. В степових, лісостепових районах мінімум ГТК доводиться на серпень, в АР Крим – на липень, в інших районах – на вересень. Максимальне середнє значення ГТК (1,62) по Україні спостерігається в травні, але по зонам максимум є розмитим і має свої особливості. Так, в травні максимум ГТК спостерігається в Північному та Південному Степу, Карпатах та Закарпатті. В Прикарпатті майже незмінне максимальне значення ГТК спостерігається протягом трьох місяців поспіль – в травні-липні, і становить 2,26-2,27. В Поліссі максимум ГТК доводиться на липень, в Лісостепу – на червень. В Криму максимальне значення ГТК = 0,86 відмічається у жовтні, що свідчить про збільшення кількості опадів за рахунок активізації циклонічної діяльності в Середземноморському басейні.

На рис. 2.11 представлена динаміка охоплення посухою по роках території України за теплий період року в цілому та по окремих сезонах. Площа розповсюдження посухи у відсотках визначалася співвідношенням кількості сіткових вузлів зі значенням ГТК  $\leq 0,5$  до загальної кількості розрахункових вузлів, які відповідали загальній площі країни.

Середні значення ГТК по агрокліматичним зонам України по місяцях  
теплого сезону за період 1995-2012 рр.

Зона	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень
Полісся	0,91	1,65	1,54	1,76	1,00	0,99	1,37
Лісостеп	0,85	1,28	1,35	1,28	0,71	0,91	1,02
Північний Степ	0,81	1,17	1,11	0,77	0,54	0,69	1,05
Південний Степ	0,71	0,94	0,86	0,54	0,52	0,55	0,88
АР Крим	0,44	0,65	0,64	0,37	0,45	0,48	0,86
Карпати	1,88	2,59	2,50	2,33	1,64	1,50	1,44
Прикарпаття	1,50	2,27	2,26	2,27	1,62	1,30	1,12
Закарпаття	2,22	2,41	2,34	1,99	1,57	1,38	1,48
Середнє	1,17	1,62	1,58	1,41	1,01	0,98	1,15

Розглянемо посухи, що спостерігалися на території України протягом 1995-2012 рр., відповідно до типізації за площею охоплення, запропонованої І.Є. Бучинським (див. п.1.2). Сильна сезонна посуха спостерігалася в 2005, 2007, 2009 та 2011 рр. з середньою площею охоплення від 31,8 до 37,4%. Років з помірною сезонною посухою було вдвічі більше: 1996, 1998, 2000, 2001, 2003, 2004, 2006, 2010 та 2012. Тобто, за розглянутий період всього 5 років характеризувалися невеликою площею розповсюдження посух протягом теплого сезону, в інших роках спостерігалися несприятливі посушливі умови. Слід відмітити, що загальне наростання інтенсивності посух (по площі охоплення) відбулося після 2002 р., коли спостерігався своєрідний мінімум посух з площею охоплення всього 14,3%. З 1995 по 2002 рр. сильних сезонних посух не спостерігалася, а в наступний період лише в одному році – 2008-му, площа посух не перевищувала 20%.

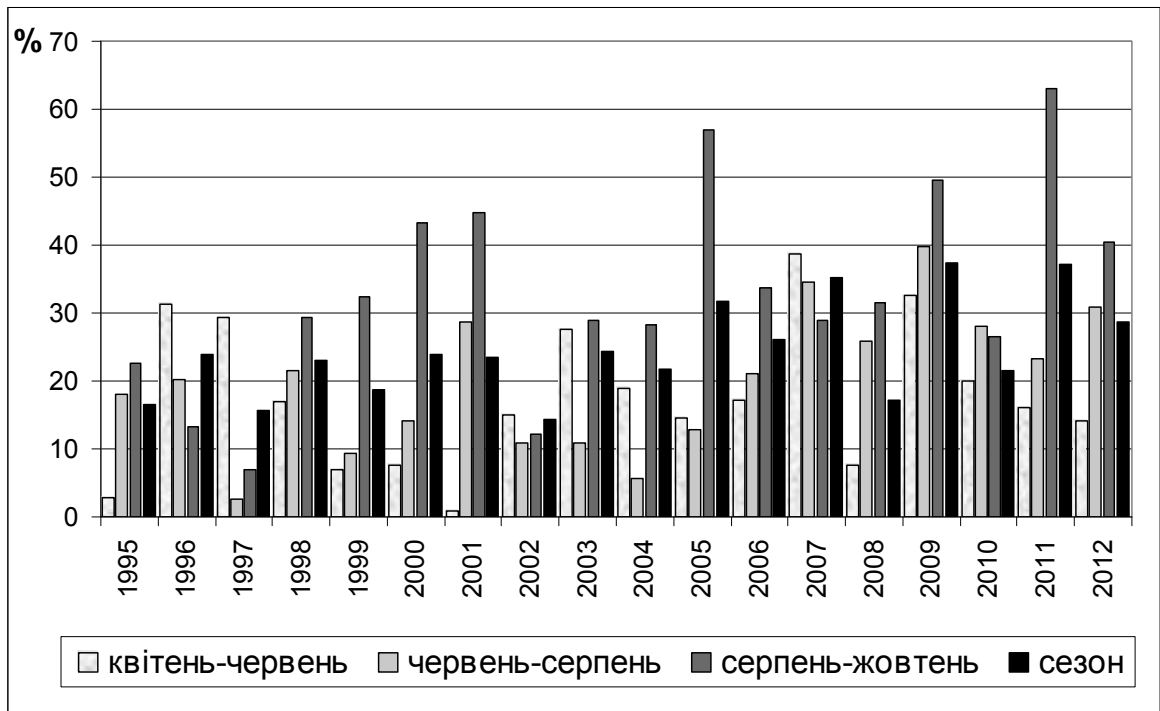


Рис. 2.11. Площі охоплення посухою (%) в теплих сезонах 1995-2012 рр.

По окремих сезонах протягом вегетаційного періоду розподіл посух більш складний. У весняно-літній період (квітень-червень) сильні посухи спостерігалися в 1996, 2007 та 2009 рр., помірні посухи відмічалися в 1996, 2003, 2010 рр. В літній період (червень-серпень) сильні посухи спостерігалися в трьох роках (2007, 2009, 2012 рр.), а ще в семи роках посухи були помірні. Наприкінці літа – восени (серпень-жовтень) кількість сильних та помірних посух максимальна – 7 та 6 відповідно. Особливо виділяються посухи 2011, 2005 та 2009 років, коли площа охоплення досягла 50% та більше, що відповідає екстремально посушливим умовам на значній частині території країни.

Таким чином, за даними про місячні значення ГТК, в розглянутий період 1995-2012 рр. для території України найбільш інтенсивними виявились посухи літньо-осіннього періоду, основний внесок до яких належить серпню та вересню, які відрізняються найменшою кількістю опадів і високим фоном температури повітря, що забезпечує умови для виникнення сильної або помірної посухи майже кожного року.

## 2.2. Оцінка посух за індексом посушливості Д.А. Педя

Розглянемо розповсюдженість посушливих умов на території України протягом вегетаційних періодів 1995-2012 рр. за допомогою показника посушливості, запропонованого Д.А. Педем. Як вже зазначалося вище (див. п. 1.2), оригінальний індекс посушливості  $S_i$  описує загальну посуху, яка відповідає посушливому стану, викликаному поєднанням атмосферних та ґрунтових умов.

В даному розділі приділимо увагу атмосферному індексу посушливості  $S_a$ , який розраховується за формулою (1.3), для визначення умов атмосферної посухи протягом досліджуваного періоду. Для оцінки стану атмосферної посушливості та зволоженості за індексом  $S_a$  в роботі [57] запропоновано використовувати шкалу, наведену в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Критерії посушливості та зволоженості за індексом атмосферної посушливості  $S_a$

Значення індексу посушливості	Характеристика умов зволоження
$S_a < -3,0$	Сильне перезволоження
$-3,0 \leq S_a < -2,0$	Помірне перезволоження
$-2,0 \leq S_a < -1,0$	Слабке перезволоження
$-1,0 \leq S_a < 1,0$	Стан, близький до норми
$1,0 \leq S_a < 2,0$	Слабка посуха
$2,0 \leq S_a < 3,0$	Помірна посуха
$S_a \geq 3,0$	Сильна посуха

Для розрахунку індексу атмосферної посушливості  $S_a$ , як й для ГТК, в дослідженні були використані дані реаналізу ERA-interim з кроком регулярної сітки 0,7 градуси – місячні поля температури на рівні 2 м та інтенсивності опадів. Було проведено осереднення по агрокліматичних зонах України в таких межах: Степ -  $\varphi = 45-48^\circ$  пн.ш.,  $\lambda = 29-40^\circ$  сх. д.; Лісостеп -  $\varphi = 48-$

50° пн.ш.,  $\lambda = 26-35,5^\circ$  сх.д.; Полісся -  $\varphi = 50-52^\circ$  пн.ш.,  $\lambda = 22-35^\circ$  сх.д.; Карпати -  $\varphi = 45-49^\circ$  пн.ш.,  $\lambda = 21-27^\circ$  сх.д.; АР Крим -  $\varphi = 45-46^\circ$  пн.ш.,  $\lambda = 32-35^\circ$  сх.д.

В табл. 2.4 представлені результати розрахунку  $S_a$ , узагальнені по сезонах вегетаційного періоду: весняно-літньому, літньому та літньо-осінньому.

У весняно-літній період (квітень-червень) в усіх агрокліматичних зонах України переважають посушливі умови, що зазначається середньорічними показниками індексу посушливості. В досліджуваній період по всіх зонах спостерігалось по чотири роки з посухами різної інтенсивності. В Степу помірні весняно-літні посухи спостерігалися в 2007 та 2012 рр., слабкі - в 2003 та 2009 рр. В Лісостепу посухи спостерігалися в тих же роках, але помірна була лише в 2012 р., інші – слабкі. В Поліссі відмічались лише слабкі посухи – в 1999, 2000, 2007 та 2011 рр.

В літній період (червень-серпень) кількість років з посухами зменшується до трьох в Поліссі та зростає до п'яти в Лісостепу. Слід відзначити, що майже всі літні посухи трапилися в період 2007-2012 рр., а попередній період характеризувався режимом підвищеної зволоженості майже в усіх агрокліматичних зонах. В Степу помірні посухи спостерігалися в 2007 та 2012 рр., слабкі – в 2009 та 2010 рр. В Лісостепу зафіксовані тільки слабкі посухи в тих же роках, що й в Степу, а також у 1999 р. В Поліссі слабкі посухи спостерігалися в 2007 та 2008 рр., помірна посуха була в 2010 р.

В літньо-осінній період (серпень-жовтень) кількість посух зменшується в Лісостепу і Поліссі до трьох випадків, та загалом посушливість знижується по всіх зонах, про що свідчать середньорічні показники. В Степу посушливими були літньо-осінні сезони 2005-2007 рр. (слабка посуха), а в 2012 р. відмічена помірна посуха. В Лісостепу слабкі посухи спостерігалися в 2008-2009 та 2012 рр. В Поліссі слабкі посухи виникли в 2005, 2007 та 2008 роках.

Таблиця 2.4

Розподіл індексу Д.А. Педя у різні сезони вегетаційного періоду 1995-2012 рр. по основним агрокліматичним зонам України

Рік	Квітень-червень			Червень-серпень			Серпень-жовтень		
	Степ	Лісостеп	Полісся	Степ	Лісостеп	Полісся	Степ	Лісостеп	Полісся
1995	-0,64	-1,03	-1,37	0,19	0,10	0,09	-0,59	-0,54	-0,23
1996	0,89	0,33	1,03	0,43	-0,29	-0,53	-2,51	-1,45	-1,20
1997	-1,29	-1,26	-1,43	-3,24	-2,22	-1,45	-3,06	-2,13	-1,29
1998	0,34	0,40	-0,53	0,41	-0,37	-1,29	0,39	-0,58	-1,16
1999	-0,05	0,77	1,04	0,67	1,04	0,74	-0,21	0,57	-0,08
2000	0,56	0,74	1,03	-0,65	-0,20	-0,23	-0,49	0,12	0,77
2001	-1,32	-1,38	-0,59	0,45	-0,05	-0,11	0,69	0,92	0,55
2002	0,58	0,13	0,48	-0,13	0,25	0,93	-1,17	-1,10	-0,83
2003	1,01	1,38	0,80	-0,68	-0,28	-0,04	-0,31	-0,90	-0,95
2004	-1,34	-0,24	-0,37	-2,21	-1,15	-0,47	-0,72	-0,21	0,35
2005	0,71	-0,01	-0,32	-0,27	-0,73	-0,24	1,03	0,66	1,10
2006	-0,41	-0,65	-0,66	-0,01	-0,33	-0,55	1,16	0,75	0,43
2007	2,13	1,99	1,41	2,39	1,48	1,05	1,38	0,38	1,16
2008	-0,05	-0,46	0,02	0,51	0,78	1,18	0,85	1,03	1,24
2009	1,56	1,74	0,75	1,31	1,38	0,27	0,94	1,03	0,69
2010	0,34	0,33	0,93	1,61	1,92	2,28	0,18	0,46	0,44
2011	-0,79	0,41	1,19	0,26	0,02	0,16	0,14	0,79	0,90
2012	2,27	2,04	0,81	2,11	1,97	0,10	2,08	1,19	0,17
Середнє	0,25	0,29	0,23	0,17	0,19	0,11	-0,01	0,05	0,11

На рис. 2.12 представлені діаграми розподілу індексу атмосферної посушливості, осереднені по території України (включаючи, окрім трьох основних зон, Карпати та АР Крим), протягом окремих сезонів. Можна бачити, що в весняно-літній період по Україні спостерігалось 5 років з посухою – 2000, 2003, 2007, 2009 та 2012 рр. В цих роках індекс Д.А. Педея був додатним по всіх зонах, при цьому в 2007 р. посуха досягала критеріїв помірної, що виділяє весну цього року як найбільш посушливу в періоді часу, що розглядається.

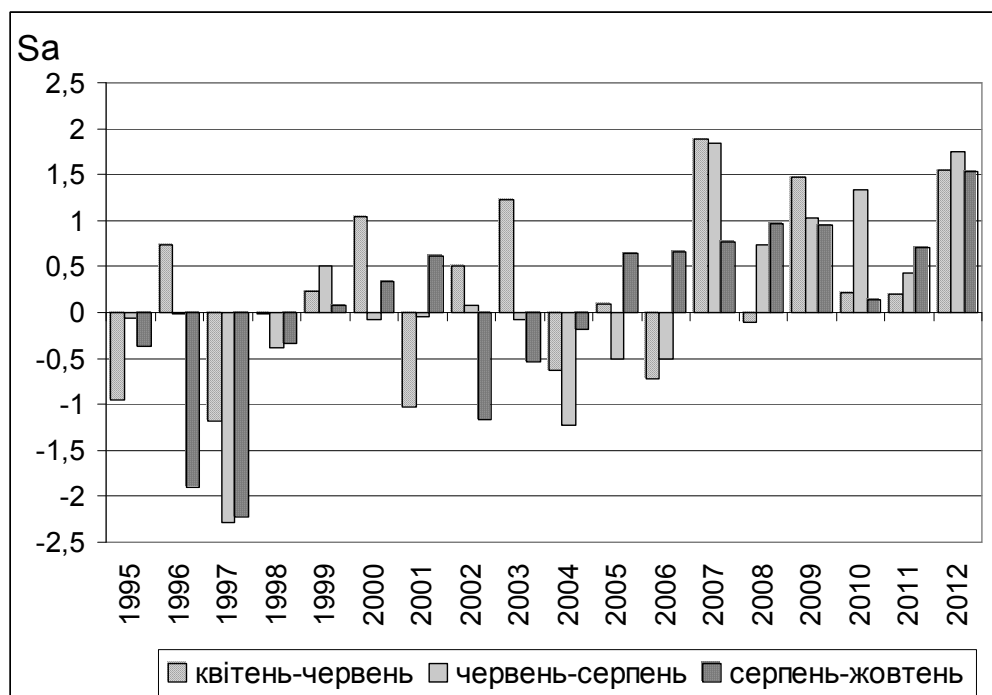


Рис. 2.12. Часовий розподіл індексу атмосферної посушливості  $S_a$ , осередненого по території України

В літній період в цілому по країні спостерігалось 4 роки з посухою – 2007, 2009, 2010 та 2012 рр., з найбільшою інтенсивністю по всіх зонах в 2007 році. Слід зазначити, що в тому ж 2007 р., а також в 2009 та 2012 рр. літня посуха стала продовженням весняної в більшості областей. В осінній період кількість років з посухою по всій країні суттєво знижується. Лише в 2012 р. по всій країні (окрім Полісся) спостерігалася слабка посуха, а в 2008 та 2009 роках посушливі явища майже досягли критерію слабкої посухи. Щодо

вологих періодів, то найбільшою зволоженістю відзначився 1997 рік, коли в усі сезони осереднений по Україні показник атмосферної посушливості був нижче за -1,0.

В цілому, слід зазначити, що наприкінці ХХ століття переважали роки з відносно сприятливими температурно-вологісними умовами. В 2000-2005 рр. слабкі посухи наголошувалися в окремих сезонах, але з 2007 по 2012 роки майже в усі сезони стали переважати посушливі умови тієї чи іншої інтенсивності.

Розглянемо деякі статистичні характеристики розрахованого по місяцях вегетаційного періоду індексу атмосферної посушливості Д.А. Педя, які представлені в Додатку Г. Як можна бачити з даних табл. Г.1, найбільш високі (додатні) середні значення  $S_a$  спостерігаються в травні та червні по всій території України, що характеризує ці місяці як найбільш посушливі. В Карпатах в другій половині літа та на початку осені переважають умови підвищеного зволоження. Середні від'ємні значення  $S_a$  в жовтні також спостерігаються в Степу та Криму.

Найвищі максимальні значення  $S_a$  по території країни перевищують 3,0, тобто в усіх зонах, за виключенням Полісся, в досліджуваний період спостерігалися сильні посухи в окремі місці. Найбільш часто такі умови склалися в травні. В Степу та Лісостепу сильні посухи відмічалися в серпні. В Карпатах сильні посухи спостерігалися в квітні, травні, липні та вересні, в Криму – в травні, серпні та жовтні. В Поліссі найінтенсивніші посухи досягали лише критерію помірних.

Значення стандартного відхилення ( $\delta$ ) індексу посушливості по різних агрокліматичним зонам коливаються в межах 1,38-1,93. Найбільші  $\delta$  відмічаються в Степу та Криму, що свідчить про високу річну та сезонну мінливість індексу. При цьому максимальні значення фіксуються в серпні. Найменша сезонна мінливість індексу посушливості – в Поліссі. В Степу, Лісостепу та Поліссі найбільш стійкі умови спостерігаються в квітні, в Карпатах – в травні, в Криму – в червні та вересні. Стандартне відхилення має



максимальні значення в другій половині літа та восени в усіх зонах, що відповідає більш різноманітним міжрічним умовам зволоження в цей період.

На рис. Г.1 представлені гістограми частотного розподілу середньомісячних (квітень-жовтень) значень індексу атмосферної посушливості по інтервалах, що відповідають критеріям табл. 2.3. Можна бачити, що по всім агрокліматичним зонам від 53 до 61 випадку (42-45%) відповідають умовам зволоження, близьким до норми. До посушливих умов ( $S_a \geq 1,0$ ) відносяться 30-33% всіх випадків, з них 18-20% – це слабкі посухи. Помірні посухи складають від 8 до 13,5% випадків, а сильні посухи зустрічаються рідко, в 1-5%, при цьому в Поліссі таких не було зовсім, як зазначалося вище.

Таким чином, аналіз індексу атмосферної посушливості Д.А. Педя для агрокліматичних зон України показав, що найбільш інтенсивні посухи спостерігалися протягом весни та літа в 2007, 2009, 2010 та 2012 рр., коли значення індексу вказували на наявність посухи слабкої або помірної інтенсивності. Найінтенсивніша осіння посуха зафіксована в 2012 р., а в цілому, в цьому році, як й в 2007, вегетаційний сезон був дуже посушливим.

### 2.3. Аналіз режиму посух за індексом Палмера

Для оцінки режиму посушливості за допомогою індексу Палмера на території України за період 1995-2012 рр. скористаємося щомісячними сітковими значеннями sc-PDSI з кроком регулярної сітки 0,5 градусів з глобальної бази даних Відділу кліматичних досліджень (CRU, Великобританія). Дані вибиралися та осереднювалися за допомогою сервісу Climate Explorer. Для осереднення по території України і основним агрокліматичним зонам використані такі координатні межі: Україна -  $\varphi = 45,5-52,2^\circ$  пн.ш.,  $\lambda = 22,5-40,5^\circ$  сх.д.; Степ –  $\varphi = 45,0-47,5^\circ$  пн.ш.,  $\lambda = 27,5-37,5^\circ$  сх.д.; Лісостеп –  $\varphi = 48,5-50,5^\circ$  пн.ш.,  $\lambda = 25,5-40,5^\circ$  сх.д.; Полісся –  $\varphi = 50,5-52,5^\circ$  пн.ш.,  $\lambda = 23,5-38,5^\circ$  сх.д.

Проведемо аналіз розподілу посух і їх інтенсивності на території України, спираючись на класифікацію посух, запропонованих Палмером (див. табл. 1.1), згідно з якою періодом з посухою вважається такий, в якому значення sc-PDSI від -1,00 та нижче, а значення від -0,50 до -0,99 відповідають зародженню посушливих умов. В табл. 2.5 представлені осереднені по території України значення sc-PDSI по місяцях вегетаційного періоду за 1995-2010 рр.

Згідно індексу Палмера, у квітні на території України посухи спостерігалися в чотирьох роках: 2002, 2003, 2007 та 2012 рр. В усіх роках посуха була м'якою. В травні розподіл посух аналогічний, при цьому інтенсивність посухи трохи зросла в 2003 та 2007 рр.

Таблиця 2.5

## Розподіл по місяцях осередненого по Україні індексу sc-PDSI

Рік	Квітень	Травень	Червень	Липень	Серпень	Вересень	Жовтень	Сезон
1995	-0,23	-0,36	-0,20	-0,84	-0,70	-0,09	-0,78	-0,46
1996	0,09	-0,14	-0,42	-0,87	-0,42	1,24	0,75	0,03
1997	0,50	0,68	0,94	1,65	1,64	1,74	2,04	1,31
1998	1,51	1,26	1,07	1,40	1,18	1,00	1,69	1,30
1999	0,52	0,13	-0,32	-0,52	-0,43	-0,69	-0,46	-0,25
2000	0,01	-0,40	-0,51	-0,14	-0,70	-0,13	-0,96	-0,40
2001	0,43	0,20	0,99	0,28	-0,17	0,64	0,06	0,35
2002	-1,18	-1,08	-0,72	-1,00	-1,05	-0,09	0,37	-0,68
2003	-1,21	-1,76	-1,92	-0,67	-0,80	-0,82	0,12	-1,01
2004	0,09	0,44	0,04	1,03	1,30	1,38	1,19	0,78
2005	1,14	1,12	1,28	1,06	1,21	0,39	0,47	0,95
2006	1,12	1,38	1,36	0,21	0,81	0,27	0,01	0,74
2007	-1,13	-1,32	-1,47	-1,34	-0,82	-0,17	-0,23	-0,93
2008	0,22	0,23	-0,33	0,09	-0,41	0,18	-0,18	-0,03
2009	-0,85	-0,77	-0,75	-0,88	-1,39	-1,22	-0,16	-0,86
2010	0,90	1,40	1,29	1,05	0,56	1,14	1,06	1,06
2011	-0,17	-0,50	0,10	0,28	-0,64	-1,14	-1,31	-0,48
2012	-1,11	-1,03	-1,25	-1,49	-1,19	-1,41	-1,13	-1,23
Середнє	0,04	-0,03	-0,05	-0,04	-0,11	0,12	0,14	0,01

У червні та липні м'яка посуха тривала в трьох роках, при цьому в 2002 році вона ослабла в червні та відновилася в серпні. В серпні посуха спостерігалася в 2002, 2009 та 2012 рр. В вересні м'яка посуха припинилася в

2002 році та утворилася в 2011 р., а також тривала в 2009 та 2012 рр. У жовтні посуха спостерігалася лише в 2011 та 2012 рр. Загалом, дуже посушливим видався вегетаційний сезон 2012 року, в якому в усі місяці спостерігалася посуха. Також посушливим був й 2003 рік, в основному за рахунок весняних місяців та початку літа. Загалом, згідно осередненим індексам Палмера, для території країни притаманна посушливість в весняно-літній сезон.

Часовий хід індексу sc-PDSI протягом вегетаційних сезонів у досліджуваній період показав (рис. 2.13), що мали місце три чітко виражених періоди з високою зволоженістю та декілька посушливих періодів. До перших відносяться сезони 1997-1999 рр., 2004-2006 рр. та 2010 рік. Посушливі сезони переважали в 1995-1996, 2002-2003 рр., 2007, 2009 та 2012 рр., при цьому вони були менш вираженими за інтенсивністю, ніж періоди високої зволоженості. Тим не менш, лінія тренду вказує на збільшення інтенсивності посух в першому десятилітті XXI століття через переважання посушливих місяців у вегетаційних періодах.

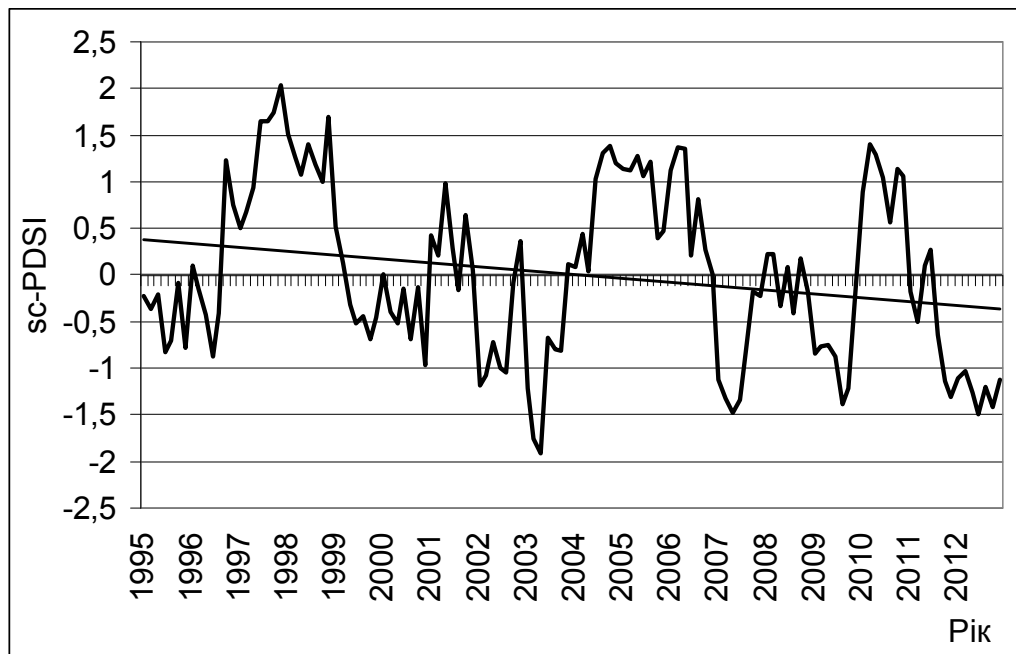


Рис. 2.13. Часовий хід індексу sc-PDSI, осередненого по Україні, протягом вегетаційних періодів (квітень-жовтень) 1995-2012 рр. (пряма – лінія тренду)

Розглянемо, як розподілявся індекс Палмера по окремим агрокліматичним зонам протягом теплих сезонів (рис. 2.14).

В Степовій зоні повністю посушливими видалися сезони 2007, 2009 та 2012 рр., при цьому в 2007 р. в липні-серпні індекс Палмера досяг значень сильної посухи. Помірна посуха спостерігалася в літні місяці 2009 р. Посушливим видався також весь сезон в 2008 р., але інтенсивність посухи не перевищила показників м'якої. В інші роки періоду, що розглядається, посухи різної інтенсивності спостерігалися в окремі місяці. В 1996 р. слабка посуха відмічалася в червні-липні. В 2002 році посушливим був весняно-літній період з слабкою посухою в травні.

В Лісостепу повністю посушливими видалися сезони 1999, 2007, 2009 та 2012 рр. В усіх перелічених роках, окрім 2009 р., інтенсивність посухи була від м'якої до помірної, а в 2009 р. її інтенсивність досягла значень сильної. В 2002, 2003 та 2007 рр. посухи інтенсивністю від м'якої до помірної спостерігалися в весняно-літній період, при цьому в 2007 році посуха подовжилася й на липень. Як можна бачити з рис. 2.14, просторова-часова розповсюдженість посушливого стану ( $sc-PDSI < 0$ ) в Лісостепу декілька більше, ніж в степовій зоні.

В Поліссі розподіл посушливих років дещо відрізняється від більш південних районів. Посушливими були сезони 1995, 2002-2003 (окрім жовтня) та 2007 років, але посуха (від м'якої до помірної) спостерігалася лише в окремі місяці цих сезонів. Так, в 2003 р. посуха спостерігалася в весняно-літній період, досягнувши максимальної інтенсивності в червні. В 1995 та 2002 роках м'яка посуха виникла в липні-серпні. В Поліссі більш розповсюджені й осінні посухи – якщо в інших зонах восени посухи, як правило, послаблюються або припиняються після літнього періоду, то в даній зоні вони, навпаки, можуть виникати або посилюватися, як це було в 1995, 2005 та 2011 рр.

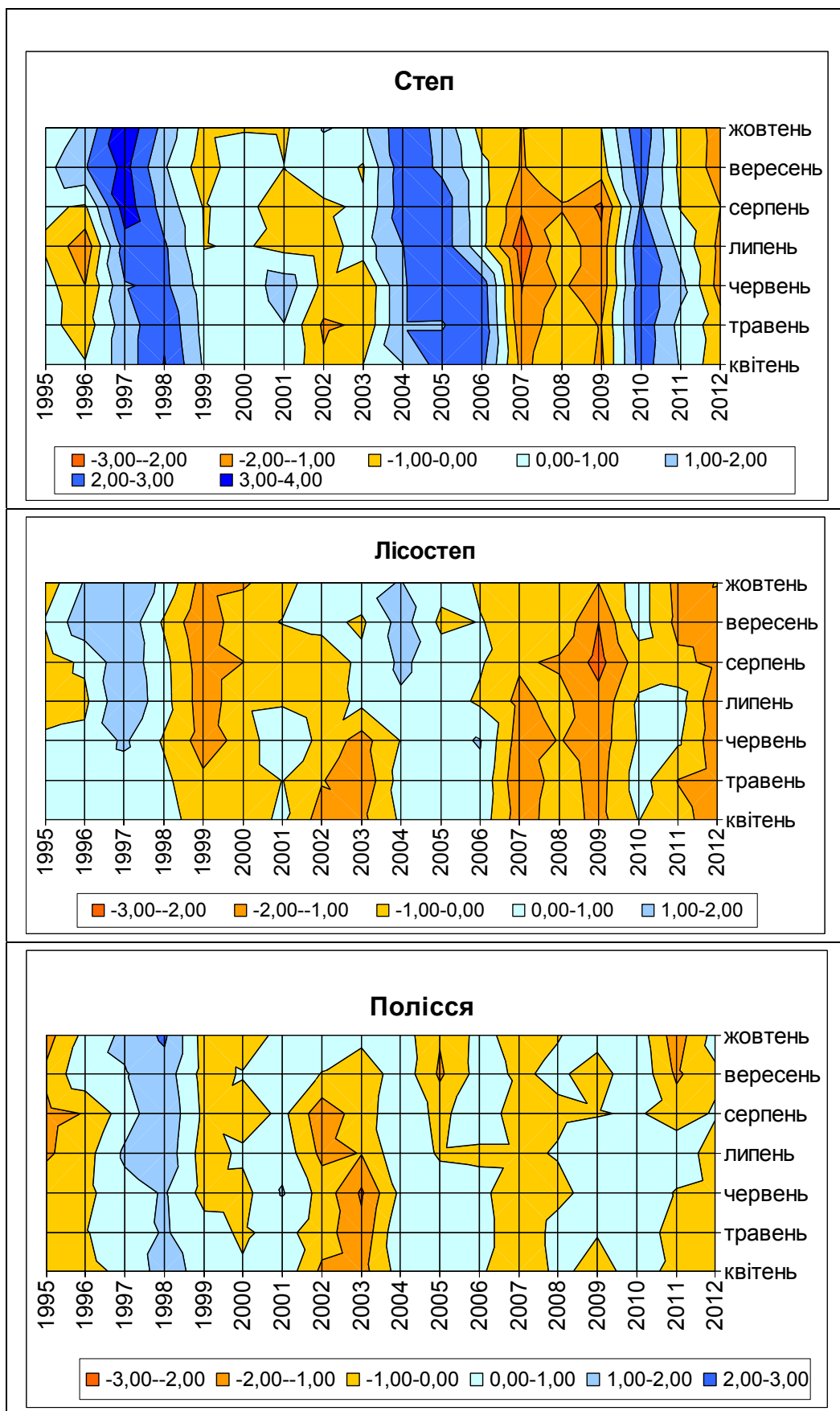


Рис. 2.14. Просторово-часовий розподіл індексу sc-PDSI, осередненого по агрокліматичним зонам, протягом вегетаційних сезонів 1995-2012 рр.

Таким чином, за індексом Палмера, найбільш інтенсивні сезонні посухи спостерігалися в степовій та лісостеповій зонах України в 2007, 2009 та 2012 роках, а в Поліссі найсуворіші посухи охоплювали територію в 1995 та 2003 роках.

Як вже зазначалося вище, індекс Палмера має ряд недоліків, які потребують акуратного використання індексу для територій поза межами США, для якого він розроблений. Оскільки вплив посушливих умов, зазвичай, позначається на продуктивності сільськогосподарських рослин, розглянемо, як співвідносяться показники урожайності озимої пшениці та ярого ячменю з осередненими по агрокліматичним зонам значенням індексу Палмера. В табл. 2.6 наведені дані щодо середніх значень індексу Палмера в весняно-літній сезон (квітень-червень) та показники урожайності, які відбивають вплив метеорологічних умов на формування врожаю – відхилення значення урожайності поточного року від тренду ( $\Delta Y$ , ц/га) та метеорологічна складова цього відхилення ( $\delta Y$ , %). Останній показник визначався для кожного року за методикою В.М. Пасова [58], яка передбачає розрахунок відхилень урожайності сільгоспкультури  $Y_i$  окремого року  $i$  від тренду  $\hat{Y}_i$  і виражається у відсотках від тренду

$$\Delta Y_i = \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{\hat{Y}_i} \cdot 100\%. \quad (2.1)$$

Трендова компонента розраховувалася за методом гармонійних ваг, запропонованого Польовим А.М. [59], з використанням даних про середню обласну урожайність сільгоспкультур за інформацією Держкомстату України. Метеорологічна складова урожайності враховує вплив погодних умов в цілому, тому її порівняння з індексом Палмера дозволить оцінити вплив посух, якщо вони були, на формування врожаю в тому чи іншому регіоні. Слід зазначити, що умови зимівлі озимої пшениці в даному дослідженні не аналізувалися.

Отже, згідно даних табл. 2.6, в Степу середньосезонне значення sc-PDSI було від'ємним в 6 роках, при цьому м'які посухи спостерігалися лише в 2007 та 2009 рр., в інших роках умови наближалися до посух. В усі посушливі роки відмічалось зниження урожайності як озимої пшениці, так й ярого ячменя. В найбільш сухий 2007 рік метеорологічна складова втрат досягала 23,8 і 49,7% відповідно. Але найбільші втрати озимої пшениці спостерігалися у 2003 р. (62,7%), хоча індекс Палмера не досяг критерію посухи. Загалом, не спостерігається чіткого взаємозв'язку показників втрат врожаю з інтенсивністю посухи. До того ж, невеликі втрати фіксувалися також в сприятливі за індексом Палмера роки, такі як 1997, 1998 та 2010, коли індекс вказував на підвищену зволоженість. Загалом, найменші втрати врожаю траплялися у роки зі зволоженістю, близькою до норми ( $-1,00 < \text{sc-PDSI} < 1,00$ ).

В Лісостепу посушливі сезони спостерігалися в дев'яти роках, з них індекс Палмера досяг критерію м'якої посухи в чотирьох роках - 2003, 2007, 2009 та 2012. Найбільші втрати врожаю озимої пшениці припали на 2003 р. (47,9%), але в інших роках з посухою втрати були значно меншими або зовсім не спостерігалися. Навпаки, в роках з умовами близькими до норми (1995, 1996, 2000, 2010 рр.) спостерігалось зменшення урожайності на 10-21%. Аналогічна картина складається й для ярого ячменю. Тут найбільші втрати врожаю припали на 2007 р. (19,5%) та 1996 р. (20,2%), при цьому в останньому випадку сезонне значення sc-PDSI відповідало відносно сприятливому стану зволоженості. Посуха 2009 року майже не позначилася на показниках урожайності обох культур.

В Поліссі посушливі умови спостерігалися в 8 роках, і лише в 2003 р. відмічена м'яка посуха. Зниження урожайності озимої пшениці відмічалось в п'яти посушливих роках, найбільші втрати зафіксовані в 1996 та 2003 рр. (18,7 та 15,8% відповідно). Доволі часто (в п'яти роках) спостерігалися зниження урожайності на фоні додатних значень індексу Палмера, близьких до нормального стану зволоження.

Таблиця 2.6

Осереднені значення індексу Палмера за весняний сезон (квітень-червень) та показники урожайності озимої пшениці і ярого ячменю (відхилення від тренду  $\Delta Y$ , ц/га, метеорологічна складова  $\delta Y$ , %)

Рік	sc-PDSI Степ	Показники урожайності в Степу				sc-PDSI Лісостеп	Показники урожайності в Лісостепу				sc-PDSI Полісся	Показники урожайності в Поліссі			
		озима пшениця		ярий ячмінь			озима пшениця		ярий ячмінь			озима пшениця		ярий ячмінь	
		$\Delta Y$	$\delta Y$	$\Delta Y$	$\delta Y$		$\Delta Y$	$\delta Y$	$\Delta Y$	$\delta Y$		$\Delta Y$	$\delta Y$	$\Delta Y$	$\delta Y$
1995	0,51	-0,9	-3,3	-1,6	-7,7	0,14	-3,4	-10,5	-0,8	-3,1	-0,36	1,6	5,7	-1,0	-4,0
1996	-0,47	-6,3	-23,7	-6,0	-30,7	0,54	-3,1	-10,3	-5,0	-20,2	-0,14	-4,9	-18,7	-2,8	-12,1
1997	1,64	2,4	9,6	-2,6	-14,1	0,77	2,0	6,7	-1,6	-6,8	0,34	-1,2	-4,8	0,4	1,8
1998	2,69	-0,1	-0,4	-2,4	-13,9	0,21	3,4	12,4	-4,5	-20,6	1,25	-0,5	-2,3	-4,8	-23,1
1999	0,67	-1,2	-4,9	-0,5	-2,9	-0,96	-3,0	-11,1	-2,9	-13,3	0,21	-0,7	-2,8	-3,1	-14,8
2000	0,24	-6,8	-28,6	-2,4	-13,5	-0,65	-4,6	-17,7	-0,1	-0,3	-0,13	-1,3	-5,7	-2,0	-9,6
2001	1,13	10,3	42,5	6,6	36,9	0,41	2,1	8,2	3,9	18,1	0,70	-1,4	-5,7	2,9	13,7
2002	-0,75	5,0	20,2	4,9	27,4	-0,91	6,4	24,1	3,3	15,0	-0,71	4,2	17,2	3,5	15,8
2003	-0,60	-15,4	-62,7	-7,0	-38,8	-1,51	-12,8	-47,9	-3,6	-16,4	-1,76	-4,0	-15,8	-0,1	-0,6
2004	1,61	6,4	25,3	4,5	24,5	0,21	6,0	21,7	2,7	12,1	0,50	6,8	26,0	2,8	11,9
2005	2,34	2,6	10,2	-1,7	-9,4	0,54	1,9	6,7	0,5	2,2	0,41	-0,2	-0,6	0,7	2,9
2006	2,54	-0,4	-1,4	1,5	7,9	0,80	-4,1	-13,8	-1,7	-7,0	0,39	-3,3	-12,0	-2,4	-9,8
2007	-1,75	-6,3	-23,8	-9,3	-49,7	-1,63	-2,1	-6,8	-4,7	-19,5	-0,94	-0,9	-3,1	-2,5	-10,0
2008	-0,35	7,3	26,7	8,0	42,1	-0,62	8,6	26,8	7,1	28,5	0,13	3,5	11,8	3,5	13,7
2009	-1,31	-0,3	-1,2	0,1	0,4	-1,43	3,9	11,6	0,0	0,0	0,07	1,1	3,8	0,7	2,9
2010	2,57	-1,2	-4,3	-2,9	-15,8	0,19	-7,4	-21,6	-4,4	-17,2	0,67	-5,7	-18,8	-4,0	-15,5
2011	0,98	3,8	13,5	3,6	19,6	-0,55	1,6	4,5	1,3	4,9	-0,37	1,9	5,9	0,0	0,1
2012	-0,91	-6,2	-23,7	-1,6	-9,1	-1,49	1,4	3,7	3,6	13,3	-0,53	2,5	7,8	2,7	10,3



При цьому в 2010 та 2006 роках зниження урожайності досягло 18,8 та 12,0% відповідно. Щодо ярого ячменю, то втрати врожаю були зафіксовані в дев'яти роках, з них лише чотири припали на посушливі роки. При цьому в найбільш сухих 2003 та 2007 роках зниження урожайності не перевищувало 10%, тоді як у відносно сприятливих за індексом Палмера 1998, 1999 та 2010 роках зниження урожайності досягало 15-23%.

Хоча зниження урожайності може викликатися різними причинами, а не тільки посухами, проведений аналіз показав, що репрезентативність індексу Палмера в умовах України повинна певним чином корегуватися. Вочевидь, використані глобальні дані є дуже згладженими, адже в агрокліматичних зонах майже не виявлено помірних та сильних посух. Порівняння з показниками урожайності показує, що має сенс уточнювати градації посух/зволоження, адже при значеннях sc-PDSI, близьких до +/-1 часто фіксуються найбільші коливання урожайності.

Нарешті, розглянемо деякі статистичні характеристики індексу Палмера по основним агрокліматичним зонам України протягом вегетаційних періодів 1995-2012 рр., які представлені в Додатку Г. Середні значення sc-PDSI, представлені у табл. Г.2 свідчать про те, що найбільш посушливою зоною виступає Лісостеп – в усіх місяцях з квітня по жовтень середні значення індексу від'ємні, а мінімальні значення припадають на весну. В Степу середні значення індексу Палмера протягом сезону додатні, але в межах норми. В Поліссі середні показники sc-PDSI близькі до нуля. Розподіл мінімальних значень індексу sc-PDSI по зонах дещо інший. Найнижчі значення зафіксовані в Степу, при цьому з травня по липень мінімуми були нижче за -2,00, що свідчить про виникнення зональних помірних посух. Абсолютний мінімум (-2,63) спостерігався у Степу в червні 2007 р. В Лісостепу екстремуми посушливості зафіксовані в травні 2009 р. (-2,34) та жовтні 2009 р. (-2,01). В інші місяці мінімальні значення sc-PDSI коливалися в межах -1,85... -1,41. В Поліссі мінімальне значення індексу Палмера (-2,16) зафіксовано в червні 2003 року, в інші місяці мінімальні значення становили від -1,72 до -1,17.

Загалом по Україні максимальна посушливість спостерігається у квітні-червні.

Значення стандартного відхилення ( $\delta$ ) індексу посушливості є найбільшими в Степу, де вони коливаються в межах 1,31-1,61, при цьому максимальний розкид даних припадає на травень-липень, що говорить про високу мінливість умов зволоження в цей період. В Лісостепу і Поліссі значення  $\delta$  є нижчими й більш однорідними і коливаються відповідно в межах 0,82-1,06 та 0,72-0,91. При цьому найбільшою мінливістю в цих зонах відрізняється жовтень.

Згідно частотному розподілу середньомісячних (квітень-жовтень) значень індексу Палмера по інтервалах та агрокліматичних зонах (рис. Г.2), до умов зволоження, близьких до норми, відносяться від 64 (Степ) до 104 (Полісся) випадків, що складає 52-85% всіх розглянутих місяців. Посушливі умови спостерігаються від 9,5% в Поліссі до 24,6% в Лісостепу, при цьому значна частина – це слабкі посухи. На помірні посухи припадає всього від 0,8% в Поліссі до 2,4% в Степу, а сильні зональні посухи за індексом Палмера не зафіксовані в досліджуваній період.

Таким чином, аналіз індексу Палмера для агрокліматичних зон України показав, що найбільш значущі посухи спостерігалися протягом весни та літа в 2003, 2007 та 2009 роках, коли їх інтенсивність досягала критерію помірної посухи. При цьому найбільш посушливою агрокліматичною зоною виявився Лісостеп через високу частоту появи посушливих місяців протягом вегетаційного періоду. Загалом, по території України в досліджуваному періоді спостерігалось збільшення повторюваності посушливих умов після 2000 року.

## 2.4. Оцінка просторово-часового розподілу посух за допомогою стандартизованих індексів опадів та опадів-евапотранспірації

В даному розділі виконана оцінка посушливості на території України в період 1995-2012 рр. за допомогою двох схожих за методикою обчислення та використання стандартизованих індексів опадів (SPI) і опадів-евапотранспірації (SPEI) (див. п. 1.2), які останнього часу набувають популярності у світовій практиці моніторингу посух.

Для аналізу посух за допомогою індексу SPI використані сіткові значення у вузлах регулярної сітки з кроком  $2,5 \times 2,5$  градуси IRI-аналізу (International Research Institute for Climate and Society) на масштабі часу 1 (SPI1) та 3 (SPI3) місяці. Дані отримані через Бібліотеку кліматичних даних IRI Data Library (<http://iridl.ldeo.columbia.edu>). Було проведено зональне осереднення по трьох широтних колах, які належать до основних агрокліматичних зон. Використані такі координатні межі: 1) Степ -  $\varphi = 46,25^\circ$  пн.ш.,  $\lambda = 28,75-38,75^\circ$  сх.д.; 2) Лісостеп -  $\varphi = 48,75^\circ$  пн.ш.,  $\lambda = 21,25-41,25^\circ$  сх.д.; 3) Полісся -  $\varphi = 51,25^\circ$  пн.ш.,  $\lambda = 23,75-33,75^\circ$  сх.д.

Вихідна інформація для аналізу режиму посух за допомогою індексу SPEI отримана з глобальної бази SPEI (The Global SPEI database), яка базується на місячних даних про опади та потенціальну евапотранспірацію від CRU. Сіткові дані індексу SPEI у вузлах регулярної сітки з кроком  $0,5$  градуси за період 1995-2012 рр. на масштабах 3 та 7 місяців вибрані та попередньо оброблені за допомогою веб-сервісу Climate Explorer. Було виконано осереднення індексу SPEI для п'яти природнокліматичних зон України в таких координатних межах: Степ –  $\varphi = 45,75-48,25^\circ$  пн. ш.,  $\lambda = 29,75 - 39,75^\circ$  сх.д.; Лісостеп –  $\varphi = 48,25-50,25^\circ$  пн.ш.,  $\lambda = 25,25-40,25^\circ$  сх.д.; Полісся –  $\varphi = 50,25-52,25^\circ$  пн.ш.,  $\lambda = 23,25-38,25^\circ$  сх.д.; АР Крим –  $\varphi = 44,25 - 45,75^\circ$  пн.ш.,  $\lambda = 32,25 - 36,25^\circ$  сх.д.; Карпати –  $\varphi = 47,75-49,75^\circ$  пн.ш.,  $\lambda = 22,25-24,75^\circ$  сх.д.

Не зупиняючись на детальному аналізі стандартизованого індексу опадів на масштабі 1 місяць (SPI1), зазначимо, що, як показано в [60], цей часовий масштаб відображує строкату картину розподілу опадів по місяцях та зонах. На рис. Г.3 можна бачити, що в усіх зонах найбільш посушливими є весняні місяці, окрім травня в Поліссі, що вказує на частий дефіцит опадів в цей період. В квітні 2009 р. по всіх зонах зафіксована екстремальна посуха зі значеннями SPI1 = -2.42...-2,62. В Степу значною посушливістю відрізняється також липень, де також відзначена екстремальна посуха в 1996 р. Загалом, переважають м'які посухи в усі місяці.

Враховуючі суттєвий вплив температури повітря в теплий період на формування посухи, оцінімо розподіл посух вегетаційного сезону за допомогою індексу SPEI на масштабі 7 місяців, з квітня по жовтень [60]. В табл. 2.7 представлений розподіл по роках індексу SPEI7 по агрокліматичним зонам України. Можна бачити, що в усіх зонах переважає посушливий стан ( $SPEI7 < 0$ ), при цьому найбільш посушливим є Степ. В Поліссі та Лісостепу середні показники близькі, в Криму та Карпатах середні значення SPEI7 найвищі. По роках розподіл SPEI7 неоднорідний. Слабкі сезонні посухи в Україні спостерігалися в семі роках, помірні посухи виникли в трьох роках – 2007, 2009 та 2012 рр. Найбільша повторюваність посух в Степу та Поліссі – 13 та 12 випадків відповідно. Сильні та екстремальні посухи виникли в Степу в 2012 та 2007 роках, в Криму в цих же роках спостерігалися екстремальні посухи. В Поліссі, Лісостепу та Карпатах посухи були переважно слабкі та іноді (1-2 випадки) помірні.

Проведемо сумісний аналіз індексів SPI та SPEI на масштабах три місяці для виявлення внутрішньосезонних агрометеорологічних посух, а також, як і для індексу Палмера, порівняємо стандартизовані індекси опадів з показниками урожайності озимої пшениці і ярого ячменю. В табл. 2.8-2.10 представлені щорічні дані щодо відповідних індексів посух, відхилення урожайності сільгоспкультур від тренду ( $\Delta Y$ ) та метеорологічна складова відхилення ( $\delta Y$ ) в трьох основних агрокліматичних зонах України. Слід

одразу відмітити, що кількість посух, які виявляються за допомогою індексу SPEI, та їх інтенсивність, майже завжди більша, ніж при визначенні за індексом SPI. При цьому, різниця найбільш відчутна в літній та літньо-осінній період, коли температурний фон в Україні особливо високий, що впливає на показник посушливості SPEI через підвищену випаровуваність.

Таблиця 2.7

Сезонні значення індексу SPEI7, осереднені по агрокліматичним зонам України за період 1995-2012 рр.

Рік	Степ	Полісся	Лісостеп	АР Крим	Карпати	Середнє по Україні
1995	0,27	-0,31	0,16	0,29	-0,95	-0,11
1996	0,18	-0,27	-0,06	0,75	-0,11	0,10
1997	2,00	1,03	1,45	2,40	0,44	1,46
1998	-0,72	0,74	-0,04	-0,94	1,33	0,07
1999	-0,86	-0,99	-1,29	0,27	-0,57	-0,69
2000	-0,07	-0,12	-0,17	-0,58	-1,52	-0,49
2001	-0,14	-0,15	0,21	0,00	0,87	0,16
2002	-0,12	-0,42	0,25	1,17	-0,40	0,10
2003	-0,27	0,06	0,09	0,01	-0,85	-0,19
2004	1,34	0,09	0,61	1,58	0,59	0,84
2005	-0,82	-0,71	-0,35	-0,71	0,54	-0,41
2006	-0,34	0,21	-0,11	0,00	0,51	0,05
2007	-2,08	-0,50	-1,04	-2,09	-0,03	-1,15
2008	0,31	0,01	0,24	-0,55	1,32	0,27
2009	-1,32	-0,67	-1,39	-1,55	-0,48	-1,08
2010	-0,49	-1,03	-0,65	-0,42	1,61	-0,20
2011	-0,50	-0,76	-0,68	-0,31	-1,55	-0,76
2012	-1,92	-0,23	-1,17	-2,41	-1,11	-1,37
Середнє	-0,31	-0,22	-0,22	-0,17	-0,02	-0,19

В степовій зоні в період, що розглядається, весняно-літні посухи різної інтенсивності спостерігалися в 9 роках за індексом SPI та в 11 роках за індексом SPEI (табл. 2.8). З них 5-6 посух були м'якими, 3 посухи помірні та 1-2 сильні посухи. Найбільш інтенсивними посухи були в 1996, 2002-2003,

2009, 2012 рр. та особливо в 2007 р., коли посуха досягла критерію сильної за обома індексами. Кількість літніх посух становила 9 за індексом SPI та 13 за індексом SPEI, при цьому в 4 роках (1996, 2007, 2009, 2012 рр.) літня посуха стала продовженням весняної. В 2007 та 2009 рр. інтенсивність літньої посухи збільшилася порівняно з весняним періодом і досягла критерію сильної.

Таблиця 2.8

Значення індексу SPI3 і SPEI3 за сезони та показники урожайності озимої пшениці та ярого ячменю (відхилення від тренду  $\Delta Y$ , ц/га, метеорологічна складова  $\delta Y$ , %) в Степу

Рік	Квітень-червень		Червень-серпень		Серпень-жовтень		Показники урожайності			
	SPI3	SPEI3	SPI3	SPEI3	SPI3	SPEI3	озима пшениця		ярий ячмінь	
							$\Delta Y$	$\delta Y$	$\Delta Y$	$\delta Y$
1995	0,92	0,44	0,14	-0,29	0,87	0,69	-0,9	-3,3	-1,6	-7,7
1996	-1,32	-1,09	-1,40	-0,85	1,85	1,83	-6,3	-23,7	-6,0	-30,7
1997	0,95	0,89	2,20	1,91	1,51	1,79	2,4	9,6	-2,6	-14,1
1998	0,46	-0,48	-0,44	-0,61	-0,69	-0,59	-0,1	-0,4	-2,4	-13,9
1999	0,04	-0,40	-0,08	-1,20	0,02	-0,37	-1,2	-4,9	-0,5	-2,9
2000	-0,38	-0,63	0,38	0,15	0,72	0,72	-6,8	-28,6	-2,4	-13,5
2001	1,11	1,22	-0,47	-0,64	-0,19	-0,58	10,3	42,5	6,6	36,9
2002	-1,24	-0,74	0,30	-0,19	1,18	1,11	5,0	20,2	4,9	27,4
2003	-1,44	-1,07	0,06	0,39	0,07	-0,07	-15,4	-62,7	-7,0	-38,8
2004	0,83	0,85	1,70	1,47	1,27	1,13	6,4	25,3	4,5	24,5
2005	-0,19	-0,37	0,50	0,35	-0,41	-1,27	2,6	10,2	-1,7	-9,4
2006	0,47	0,31	0,23	-0,17	-0,38	-0,88	-0,4	-1,4	1,5	7,9
2007	-1,50	-1,68	-1,68	-1,94	0,37	-0,80	-6,3	-23,8	-9,3	-49,7
2008	-0,02	0,31	-0,08	-0,36	0,01	-0,51	7,3	26,7	8,0	42,1
2009	-0,94	-1,06	-1,62	-1,43	-0,60	-0,63	-0,3	-1,2	0,1	0,4
2010	0,46	-0,34	-0,04	-1,33	0,87	-0,21	-1,2	-4,3	-2,9	-15,8
2011	1,03	0,51	0,10	-0,30	-0,95	-0,87	3,8	13,5	3,6	19,6
2012	-0,68	-1,74	-0,27	-1,08	-0,29	-0,72	-6,2	-23,7	-1,6	-9,1

Наприкінці літа і в осінній період кількість та інтенсивність посух в Степу зменшилася до 7 за індексом SPI та до 12 за індексом SPEI, при цьому в першому випадку всі посухи були слабкими, в другому в 2005 р. зафіксована помірна посуха, інші м'які. В чотирьох роках (1998, 2001, 2009, 2012 рр.) посухи продовжували літній період, але стали більш слабкими. В 2009 та 2012

роках посуха в Степу спостерігалася протягом всіх сезонів вегетаційного періоду.

Порівняння з показниками урожайності показує, що найбільші втрати як озимої пшениці, так й ярого ячменю виникли в роки з виявленими принаймні весняно-літніми посухами, але з інтенсивністю цих посух прямого зв'язку не простежується. Так, якщо в 1996, 2003, 2007 та 2012 рр. метеорологічна складова втрат по озимій пшениці складала 23-62%, по ярому ячменю 15-50%, інтенсивність посухи в цих роках коливалася від помірної до сильної. Навесні 2000 р. спостерігалася м'яка посуха за обома індексами, але втрати врожаю також були в наведених межах. Й навпаки, в 2009 р. за наявності м'якої за індексом SPI та помірної за індексом SPEI посухи втрати врожаю були невеликими (1-3%).

В Лісостеповій зоні спостерігалася 10 весняно-літніх сезонів з посухами різної інтенсивності за індексом SPI та 11 посух за індексом SPEI (табл. 2.9). Більшість посух були м'якими, від 2 до 4 посух – помірними. Сильних та екстремальних посух не спостерігалася. В 2003 та 2007 рр. за обома індексами відмічена помірна посуха, в 2009 та 2012 рр. помірна посуха була тільки за індексом SPEI. Кількість літніх посух зменшується в півтора рази за індексом SPI і всього на 1-2 випадки за індексом SPEI. Влітку спостерігалася 6 років з м'якими посухами, а за індексом SPEI в 1999, 2009 та 2010 рр. відмічена помірна посуха. Кількість літньо-осінніх посух майже така, як і влітку, але збільшується частка помірних посух в індексі SPI. Восени 2011 р. спостерігалася помірна посуха за обома індексами, в 2009 р. - за індексом SPEI. Інші посухи восени були м'якими.

Посуха протягом всіх сезонів вегетаційного періоду в Лісостеповій зоні спостерігалася в 1999 та 2009 роках за обома індексами (як і в Степу), але в значеннях SPI посуха була переважно м'якою (окрім літа), а в значеннях SPEI - помірною. Посухи, що охоплювали весну та літо, відзначені в 1996, 2007 та 2012 роках.

Таблиця 2.9

Значення індексу SPI3 і SPEI3 за сезони та показники урожайності озимої пшениці та ярого ячменю (відхилення від тренду  $\Delta Y$ , ц/га, метеорологічна складова  $\delta Y$ , %) в Лісостепу

Рік	Квітень-червень		Червень-серпень		Серпень-жовтень		Показники урожайності			
	SPI3	SPEI3	SPI3	SPEI3	SPI3	SPEI3	озима пшениця		ярий ячмінь	
							$\Delta Y$	$\delta Y$	$\Delta Y$	$\delta Y$
1995	0,72	0,39	0,11	-0,35	0,73	0,63	-3,4	-10,5	-0,8	-3,1
1996	-0,74	-0,86	-0,97	-0,70	1,85	1,38	-3,1	-10,3	-5,0	-20,2
1997	0,67	0,83	1,30	1,19	0,83	1,04	2,0	6,7	-1,6	-6,8
1998	-0,13	-0,77	0,20	0,15	0,15	0,23	3,4	12,4	-4,5	-20,6
1999	-0,36	-0,88	-0,68	-1,22	-0,33	-0,68	-3,0	-11,1	-2,9	-13,3
2000	-0,51	-0,56	0,01	0,15	-0,39	-0,37	-4,6	-17,7	-0,1	-0,3
2001	1,15	1,36	0,52	0,02	-0,19	-0,52	2,1	8,2	3,9	18,1
2002	-0,73	-0,19	0,10	-0,26	1,26	1,10	6,4	24,1	3,3	15,0
2003	-1,48	-1,10	0,20	0,70	0,29	0,40	-12,8	-47,9	-3,6	-16,4
2004	-0,08	-0,02	1,14	0,83	0,82	0,61	6,0	21,7	2,7	12,1
2005	0,02	0,00	0,68	0,54	-0,11	-0,57	1,9	6,7	0,5	2,2
2006	0,83	0,61	0,50	0,07	0,18	-0,38	-4,1	-13,8	-1,7	-7,0
2007	-1,20	-1,13	-0,52	-0,77	1,00	-0,06	-2,1	-6,8	-4,7	-19,5
2008	0,29	0,31	0,03	-0,44	0,19	-0,50	8,6	26,8	7,1	28,5
2009	-0,80	-1,02	-0,99	-1,21	-0,44	-1,08	3,9	11,6	0,0	0,0
2010	0,72	-0,39	-0,04	-1,28	0,38	-0,38	-7,4	-21,6	-4,4	-17,2
2011	0,28	0,00	0,64	0,15	-1,25	-1,26	1,6	4,5	1,3	4,9
2012	-0,63	-1,33	-0,42	-0,78	0,13	0,08	1,4	3,7	3,6	13,3

Порівняння виявлених посух в весняно-літній період з показниками урожайності показало відсутність чіткого зв'язку, що свідчить про наявність впливу на формування врожаю в Лісостепу інших вагомих погодних чинників, а не лише тільки посух. Так, якщо в 2003 р. в умовах помірної посухи втрати озимої пшениці досягли майже 48%, а ярого ячменю 17%, то в 2007 р. при посусі тієї ж інтенсивності втрати по озимій пшениці були невеликими, але для ячменю досягли 20%. Крім того, весняні посухи 1998, 2002, 2009 та 2012 рр. зовсім не викликали зменшення урожайності.

Часовий розподіл посух в Поліссі має деякі відмінності порівняно з південнішими агрокліматичними зонами України (табл. 2.10). До того ж, зростає неузгодженість між індексами SPI та SPEI у виявлені та інтенсивності



посух. Кількість посух в весняно-літній період склала від 8 за значеннями SPI до 11 за значеннями SPEI, при цьому помірна посуха за першим показником фіксувалася в 2003 та 2004 рр., за другим – в 1999 р. Слід зазначити, що в 2004 році в Степу весняна посуха не спостерігалася зовсім, а в Лісостепу відмічалися майже нейтральні умови зволоження.

Таблиця 2.10

Значення індексу SPI3 і SPEI3 за сезони та показники урожайності озимої пшениці та ярого ячменю (відхилення від тренду  $\Delta Y$ , ц/га, метеорологічна складова  $\delta Y$ , %) в Поліссі

Рік	Квітень-червень		Червень-серпень		Серпень-жовтень		Показники урожайності			
	SPI3	SPEI3	SPI3	SPEI3	SPI3	SPEI3	озима пшениця		ярий ячмінь	
							$\Delta Y$	$\delta Y$	$\Delta Y$	$\delta Y$
1995	0,69	0,44	-0,67	-0,62	0,50	-0,13	1,6	5,7	-1,0	-4,0
1996	-0,86	-0,87	-0,66	-0,39	0,48	0,59	-4,9	-18,7	-2,8	-12,1
1997	0,56	0,76	0,67	0,54	0,35	0,44	-1,2	-4,8	0,4	1,8
1998	0,85	-0,07	1,17	0,75	0,84	0,67	-0,5	-2,3	-4,8	-23,1
1999	-0,48	-1,02	-0,08	-0,90	0,24	-0,19	-0,7	-2,8	-3,1	-14,8
2000	-0,40	-0,59	0,30	0,32	-0,86	-0,82	-1,3	-5,7	-2,0	-9,6
2001	0,51	0,56	0,32	-0,20	0,06	-0,29	-1,4	-5,7	2,9	13,7
2002	-0,28	-0,35	-1,18	-1,26	1,08	0,66	4,2	17,2	3,5	15,8
2003	-1,38	-0,93	-0,36	0,12	0,69	0,77	-4,0	-15,8	-0,1	-0,6
2004	-1,42	0,14	-0,28	0,08	-0,09	-0,35	6,8	26,0	2,8	11,9
2005	0,29	0,31	-0,24	0,06	-0,84	-1,04	-0,2	-0,6	0,7	2,9
2006	0,41	0,27	1,01	0,51	1,39	0,49	-3,3	-12,0	-2,4	-9,8
2007	-0,81	-0,95	0,53	-0,05	-0,43	-0,68	-0,9	-3,1	-2,5	-10,0
2008	0,30	0,11	-0,36	-0,52	0,33	-0,44	3,5	11,8	3,5	13,7
2009	0,11	-0,31	-0,06	-0,40	-0,40	-0,74	1,1	3,8	0,7	2,9
2010	0,07	-0,97	-0,19	-1,36	0,23	-0,48	-5,7	-18,8	-4,0	-15,5
2011	-0,73	-0,65	1,03	0,45	-1,45	-1,24	1,9	5,9	0,0	0,1
2012	0,88	-0,27	0,84	0,23	1,29	0,66	2,5	7,8	2,7	10,3

Кількість літніх посух в Поліссі навпаки, найбільша – посухи відмічалися в 9-10 роках в досліджуваному періоді, при переважній більшості м'яких. Помірні посухи влітку зафіксовані в 2002 р. за обома індексами і в 2010 р. за індексом SPEI. При цьому літня посуха 2002 р. спостерігалася лише в Поліссі. Повторюваність літньо-осінніх посух така ж, як в інших зонах - спостерігалася 6 років з посухою за індексом SPI та 11 років за індексом

SPEI. При цьому помірна посуха за обома індексами відмічалася в 2011 р. (як й в Лісостепу), та в 2003 р. за індексом SPEI, інші посухи досягли критерію м'якої. Посухи, що охоплювали Полісся протягом весни та літа, за обома індексами відмічалися в 1996, 1999, 2002 рр.

Зв'язок між показниками посушливості та коливанням урожайності сільгоспкультур в Поліссі також непрямий. Якщо в 1996, 2003 та 2010 рр. в умовах весняної посухи (за індексом SPEI) втрати врожаю озимої пшениці та ярого ячменю склали 10-19%, то в 2006 р. за повної відсутності посухи врожай культур знизився на 10-12%. Невелике зменшення урожайності озимої пшениці (3-5%) фіксуються в роки як з м'якою посухою, так й за додатних значень індексів посушливості.

Таким чином, порівняльний аналіз індексів посушливості SPI та SPEI показав, що перший індекс є більш доцільним для використання в північних районах України, де температурний режим помірний, а режим зволоження більш рівномірний. Індекс SPEI підвищує надійність виявлення посух в жарких районах з недостатнім та нестійким режимом зволоження, що притаманне для Степової та Лісостепової зон України. Обидва показники добре узгоджуються за інтенсивністю в яскраво виражені та тривалі посушливі періоди. Найбільш поширені і інтенсивні посухи в Україні спостерігаються весною та на початку літа. В цей період частіше трапляються помірні посухи, що охоплюють майже всі агрокліматичні зони і в деяких з них досягають критерію сильної. Влітку зменшується просторовий масштаб посух при загальному збереженні інтенсивності. В осінній період інтенсивність посух зменшується, але вони стають більш поширеними, ніж влітку.

## 2.5. Каталог сезонних посух в Україні за період 1995-2012 рр.

Згідно розглянутим в попередніх розділах особливостям використання окремих індексів посух для ідентифікації посушливих умов в Україні,

представимо отриману інформацію в узагальненому вигляді. Для сумісної інтерпретації різнорідних індексів зведемо їх критерії, що вказують на посуху, до одноманітного вигляду, як наведено в табл. 2.11. В табл. 2.12-2.14 представлені узагальнені по сезонах індекси посух в умовних позначках, згідно табл. 2.11, по основним агрокліматичним зонам України. Проаналізуємо просторово-часовий розподіл сезонних (агrometeorологічних) посух протягом 1995-2012 рр., приймаючи, що сезоном з посухою вважається такий, в якому щонайменше чотири індекси з п'яти вказували на наявність посухи будь-якої інтенсивності.

Таблиця 2.11

## Узагальнені категорії посух за критеріями різних індексів

Значення індексу				Категорія посухи	Умовна позначка посухи
ГТК	S <sub>a</sub>	SPI, SPEI	PDSI		
-	0,00 ... 0,99	-	-0,99 ... -0,01	Початок сухого періоду	0
0,70 ... 1,00	1,00 ... 1,99	-0,99... 0,00	-1,99 ... -1,00	М'яка	1
0,51 ... 0,69	2,00 ... 2,99	-1,49...-1,00	-2,99 ... -2,00	Помірна	2
0,40 ... 0,50	≥ 3,00	-1,99...-1,50	-3,99 ... -3,00	Сильна	3
≤ 0,39	-	≤ -2,00	≤ -4,00	Екстремальна	4

В Степовій зоні (табл. 2.12) весняно-літні (квітень-червень) посухи є досить розповсюдженим явищем – комбінація індексів вказує на 8 років з посухою. При цьому, найбільш інтенсивною була посуха в 2007 р., коли індекси посух коливалися від сильної (SPI, SPEI) до екстремальної (ГТК) категорії. В 1996 і 2003 рр. індекси показували інтенсивність посухи від помірної до сильної, в інших 5 роках – від м'якої до помірної. Найбільша кількість посух визначена за індексами ГТК та SPEI – по 11 сезонів, але вони не завжди співпадають між собою. Кількість м'яких посух, що визначаються індексами ГТК, SPI, SPEI, коливається в межах 5-7, для індексів Палмера та Педя їх кількість значно менша завдяки категорії, що передбачає початок

сухого періоду. Ця особливість проявляється й в інших сезонах та агрокліматичних зонах. Кількість помірних посух більша за індексами SPI, SPEI, а кількість сильних посух коливається в межах 1-2 за різними індексами.

Повторюваність літніх (червень-серпень) посух в Степу трохи менше, ніж весною. В досліджуваний період спостерігалось 7 років з літньою посухою. Сильними були посухи в 2007 та 2009 рр., коли фіксувалися навіть екстремальні показники ГТК. В 1996 та 2012 рр. спостерігалися посухи від м'яких до помірних за більшістю показників, а в 1999, 2008 та 2010 рр. посухи були м'якими. Слід зазначити, що в літній період значно зростає як кількість, так й інтенсивність посух за значеннями гідротермічного коефіцієнту Селянинова – посухи визначаються майже щорічно (окрім 1997 та 2004 рр.). Така повторюваність посух не фіксується іншими індексами, а більшість збігань спостерігається з індексом SPEI, який загалом визначає меншу інтенсивність посухи. Найменша кількість літніх посух виявлена за індексом Педя – всього 6 років, при цьому 2 з них відповідають початку посушливого періоду.

В літньо-осінній період (серпень-жовтень) в Степу спостерігалось 8 років з посухою переважно м'якої або помірної інтенсивності. Найбільш суворими були посухи 2007, 2009 та 2012 рр., коли принаймні 2 індекси вказували на помірну або сильну посуху. В інших роках (2001, 2005, 2006, 2008, 2011 рр.) показники відповідали переважно м'якій посусі. Слід звернути увагу, що, як й влітку, восени показники гідротермічного коефіцієнту Селянинова визначають велику кількість посух – 15, при цьому половина з них відноситься до категорії сильних та екстремальних, значно перевищуючи загальні показники посух в цей період року порівняно з іншими індексами. Значну кількість посух – 12, виявляє й індекс SPEI, але цей показник не відрізняється від літніх та весняних посух за кількістю, та вказує на значно менш інтенсивні посушливі умови. Показники індексу Педя повністю співпадають з кількістю узагальнено виявлених літньо-осінніх посух.

Таблиця 2.12

Розподіл та інтенсивність сезонних посух в Степу за 1995-2012 рр.

Рік	Квітень-червень					Червень-серпень					Серпень-жовтень				
	ГТК	sc-PDSI	SPI	SPEI	S <sub>a</sub>	ГТК	sc-PDSI	SPI	SPEI	S <sub>a</sub>	ГТК	sc-PDSI	SPI	SPEI	S <sub>a</sub>
1995	1					2			1		1				
1996	3	0	2	2	0	3	0	2	1						
1997															
1998	1			1		2		1	1		4		1	1	
1999				1		2		1	1	0	2	0		1	
2000	1		1	1	0	1					1				
2001						1		1	1		4	0	1	1	0
2002	2	0	2	1	0	1	0		1		1				
2003	3	0	2	2	1	1	0				2			1	
2004											1				
2005	1		1	1	0	1					4		1	2	1
2006						1			1		3		1	1	1
2007	4	1	3	3	2	4	2	3	3	2	2	1		1	1
2008		0	1			1	0	1	1	0	3	0		1	0
2009	1	1	1	2	1	4	1	3	2	1	3	0	1	1	0
2010				1		1		1	2	1				1	
2011	1					1			1		3	0	1	1	
2012	1	0	1	3	2	4	1	1	2	2	3	1	1	1	2
<b>Всього:</b>	<b>11</b>	<b>7</b>	<b>9</b>	<b>11</b>	<b>8</b>	<b>16</b>	<b>7</b>	<b>9</b>	<b>13</b>	<b>6</b>	<b>15</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>12</b>	<b>7</b>
початок сух. пер.		<b>5</b>			<b>4</b>		<b>4</b>			<b>2</b>		<b>5</b>			<b>3</b>
м'яких	<b>7</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>9</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>9</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>7</b>	<b>11</b>	<b>3</b>
помірних	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
сильних	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
екстре- мальних	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Таким чином, в Степовій зоні в період 1995-2012 рр. фіксувалося 7-8 агрометеорологічних посух в кожному сезоні. Протягом всього вегетаційного періоду посухи спостерігалися в трьох роках – 2007, 2009 та 2012 рр. При цьому, найбільш інтенсивною виявилася посуха 2007 р., яка досягала критеріїв сильної та екстремальної весною та влітку. В 2009 р. екстремальні показники посухи відмічалися тільки в літній період, а посуха 2012 р. досягала лише критеріїв помірної інтенсивності.

В Лісостепу кількість весняно-літніх посух декілька скорочується, порівняно зі Степом, особливо в показниках гідротермічного коефіцієнту (табл. 2.13). За досліджуваний період спостерігалось шість років (1999, 2000, 2003, 2007 та 2009, 2012 рр.), в яких 4-5 індексів вказували на посуху. В 2003 та 2007 роках інтенсивність посухи була від м'якої до помірної, в інших роках посухи були переважно м'якими. Найбільша кількість посух виявляється за індексами SPI та SPEI – 10 та 11 випадків відповідно. За індексом Педя виявлено 6 посух, при цьому всі вони співпадають з посушливими роками за іншими індексами. За індексом Палмера половина випадків відноситься до початку посушливого періоду.

Влітку в Лісостепу спостерігалось 5 років з посухами – 1999, 2007, 2009, 2010 та 2012 рр., в більшості з яких всі п'ять індексів вказували на посуху. За значеннями індексів переважала м'яка посуха. Найбільшу кількість та інтенсивність посух дає індекс SPEI – 9 випадків, з них 3 посухи віднесені до помірних, в тому числі у загально виділених посушливих роках.

Літньо-осінні посухи в Лісостепу такі ж часті як й весняні – протягом 18 років спостерігалось 6 посух (1999, 2000, 2001, 2005, 2009 та 2011 рр.). З них помірна сезонна посуха майже за всіма індексами спостерігалася в 2011 р., в інших роках посуха була м'якою. В цьому сезоні значно збільшується кількість посух, виявлених за значеннями гідротермічного коефіцієнту – до 11 випадків, але лише половина з них підтверджується іншими індексами.

Таблиця 2.13

Розподіл та інтенсивність сезонних посух в Лісостепу за 1995-2012 рр.

Рік	Квітень-червень					Червень-серпень					Серпень-жовтень				
	ГТК	sc-PDSI	SPI	SPEI	S <sub>a</sub>	ГТК	sc-PDSI	SPI	SPEI	S <sub>a</sub>	ГТК	sc-PDSI	SPI	SPEI	S <sub>a</sub>
1995							0		1			0			
1996			1	1				1	1						
1997															
1998			1	1											
1999		0	1	1	0		1	1	2	1	1	1	1	1	0
2000		0	1	1	0						1	0	1	1	
2001											1	0	1	1	0
2002		0	1	1			0		1						
2003	1	1	2	2	1		0								
2004			1	1							1				
2005											1		1	1	0
2006											1			1	0
2007		1	2	2	1	1	1	1	1	1		0		1	
2008		0					0		1	0	1	0		1	1
2009		1	1	2	1	1	1	1	2	1	1	1	1	2	1
2010				1			0	1	2	1	2			1	
2011		0					0				2	1	2	2	0
2012		1	1	2	2	1	1	1	1	1	1	1			1
<b>Всього:</b>	<b>1</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>6</b>	<b>3</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>9</b>	<b>6</b>	<b>11</b>	<b>9</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>8</b>
початок сух. пер.		<b>5</b>			<b>2</b>		<b>6</b>			<b>1</b>		<b>5</b>			<b>5</b>
м'яких	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>9</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>3</b>
помірних	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>0</b>
сильних	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
екстре- мальних	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Загалом по Лісостепу в досліджуваний період найбільш посушливими видалися 1999 та 2009 роки, коли протягом всього вегетаційного періоду спостерігалася посуха, переважно слабкої інтенсивності. В 2007 та 2012 роках помірна посуха охопила весняний та літній сезони. В інші роки посуха тривала не більше одного сезону.

В Поліссі, як й на решті території України, весняно-літні посухи переважають над посухами літнього періоду (табл. 2.14), але їх часовий розподіл дещо відрізняється від більш південних агрокліматичних зон. За досліджуваний період в квітні-червні спостерігалася п'ять посух – в 1996, 2000, 2003, 2007 та 2011 рр. Посухи були переважно м'які і лише в 2003 р. індекс SPI вказував на помірну посуху. Як й в Лісостепу, гідротермічний коефіцієнт виявив найменшу кількість посух – дві, які збіглися з іншими показниками в ці роки. Найбільша кількість років з посухами належить індексу SPEI, як й в інших зонах. Слід зазначити, що кількість посух, яка визначається за цим показником, незначно варіює як між сезонами в межах однієї агрокліматичної зони, так і між самими зонами в межах території країни, і складає від 9 випадків в Лісостепу і Поліссі й до 12 випадків в Степу. Індекс SPI має таку ж тенденцію, але з меншою кількістю випадків посух, завдяки схожій процедурі розрахунку. Інші індекси посушливості мають значну просторово-часову мінливість.

В літній період в Поліссі кількість посух зменшується вдвічі, спостерігалася три посухи – м'які в 1999 та 2008 рр. і переважно помірна в 2002 р. Зазначимо, що в 2010 р, якій, як відомо [61], характеризувався посухою на території Східної Європи, в Поліссі на помірну посуху вказували індекс Педя та SPEI, на м'яку – індекс SPI, але показники індексу Палмера та ГТК відповідали стану, близькому до нормальних умов зволоження.

В літньо-осінній період в Поліссі кількість посух збільшується порівняно з літом до 5 випадків: переважно м'які посухи спостерігалися в 2000, 2007 та 2009 рр., більш інтенсивні посухи – в 2005 та 2011 р.



Таблиця 2.14

Розподіл та інтенсивність сезонних посух в Поліссі за 1995-2012 рр.

Рік	Квітень-червень					Червень-серпень					Серпень-жовтень				
	ГТК	sc-PDSI	SPI	SPEI	S <sub>a</sub>	ГТК	sc-PDSI	SPI	SPEI	S <sub>a</sub>	ГТК	sc-PDSI	SPI	SPEI	S <sub>a</sub>
1995		0					0	1	1			1		1	
1996	1	0	1	1			0	1	1						
1997															
1998				1							1				
1999			1	2	1		0	1	1	0	1	0		1	
2000	1	0	1	1	1		0				2	0	1	1	0
2001									1					1	0
2002		0	1	1		1	1	2	2	0		0			
2003		1	2	1	0		1	1				0			
2004			2					1			1		1	1	
2005								1			4	0	1	2	1
2006															
2007		0	1	1	1		0		1	1	1	0	1	1	1
2008							0	1	1	1		0		1	1
2009				1	0			1	1			0	1	1	0
2010				1	0			1	2	2	2			1	
2011		0	1	1	1						1	1	2	2	0
2012		0		1			0								
Всього:	<b>2</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>11</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>6</b>	<b>11</b>	<b>7</b>
початок сух. пер.		7			3		7			2		8			
м'яких	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>10</b>	<b>4</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>9</b>	<b>7</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>9</b>	<b>3</b>
помірних	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>0</b>
сильних	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
екстре- мальних	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Як й в Лісостепу, восени збільшується кількість значень ГТК, що вказують на посуху, при цьому в 2005 р. за даним індексом посуха була екстремальною. Загалом, в Поліссі найбільш посушливим виявилися вегетаційні періоди 2000, 2007 та 2011 років, коли переважно м'яка посуха спостерігалася протягом весняного та осіннього сезонів.

Таким чином, у 1995-2012 рр. на території України виявлено декілька років з 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 була у 2000, 2003 та 2007 рр., при цьому вона досягала сильної та навіть екстремальної інтенсивності. В двох зонах одночасно посуха спостерігалася у 1996, 2009 та 2012 рр., переважно слабкої та помірної інтенсивності. Влітку три зони були охоплені посухою у 1999 році, по дві зони – у 2007, 2009, 2010 та 2012 рр., 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 рр., по дві зони – у 2001, 2007 та 2012 рр. У 2005 р. посуха за інтенсивністю досягла критеріїв сильної та екстремальної, у 2011 р. була помірною, в інших роках – м'якою.

Як показано вище, просторово-часовий розподіл деяких індексів посух добре узгоджується, що дозволяє за допомогою їх комбінації об'єктивно виділити періоди з посухою та визначити її інтенсивність. Оцінимо тісноту статистичного зв'язку між розглянутими п'ятьма індексами посух за допомогою множинної кореляції. В табл. 2.16 представлені результати аналізу кореляційного зв'язку між сезонними значеннями індексів посушливості за досліджуваний період. Як можна бачити, найвищі значення коефіцієнтів кореляції ( $r$ ) між усіма параметрами спостерігаються в Степовій зоні, а також в весняний і літній періоди.

Таблиця 2.16

Кореляційні матриці для індексів посушливості по сезонах в агрокліматичних зонах України

Регіон	Квітень-червень					Червень-серпень					Серпень-жовтень				
	S <sub>a</sub>	SPEI	SPI	sc-PDSI	ГТК	S <sub>a</sub>	SPEI	SPI	sc-PDSI	ГТК	S <sub>a</sub>	SPEI	SPI	sc-PDSI	ГТК
<b>Степ</b>															
S <sub>a</sub>	1,00					1,00					1,00				
SPEI	-0,97	1,00				-0,96	1,00				-0,91	1,00			
SPI	-0,85	0,88	1,00			-0,84	0,89	1,00			-0,78	0,91	1,00		
sc-PDSI	-0,61	0,60	0,74	1,00		-0,61	0,63	0,74	1,00		-0,62	0,51	0,51	1,00	
ГТК	-0,80	0,86	0,85	0,56	1,00	-0,95	0,94	0,91	0,67	1,00	-0,75	0,77	0,84	0,65	1,00
<b>Лісостеп</b>															
S <sub>a</sub>	1,00					1,00					1,00				
SPEI	-0,93	1,00				-0,89	1,00				-0,86	1,00			
SPI	-0,83	0,86	1,00			-0,73	0,86	1,00			-0,66	0,89	1,00		
sc-PDSI	-0,82	0,69	0,75	1,00		-0,85	0,77	0,81	1,00		-0,75	0,74	0,65	1,00	
ГТК	-0,81	0,83	0,80	0,55	1,00	-0,88	0,86	0,82	0,82	1,00	-0,76	0,70	0,46	0,45	1,00
<b>Полісся</b>															
S <sub>a</sub>	1,00					1,00					1,00				
SPEI	-0,92	1,00				-0,78	1,00				-0,82	1,00			
SPI	-0,55	0,60	1,00			-0,40	0,76	1,00			-0,57	0,90	1,00		
sc-PDSI	-0,46	0,45	0,49	1,00		-0,40	0,43	0,60	1,00		-0,38	0,47	0,44	1,00	
ГТК	-0,63	0,64	0,73	0,51	1,00	-0,84	0,80	0,72	0,68	1,00	-0,72	0,77	0,60	0,21	1,00

\* - виділені незначущі коефіцієнти кореляції.

В усіх зонах найтісніший зв'язок спостерігається між індексом Педя ( $S_a$ ) та стандартизованим індексом опадів-евапотранспірації (SPEI), взятим на масштабі три місяці: коефіцієнти кореляції досягають в Степу  $-0,96 \dots -0,97$  навесні та влітку і знижуються до  $-0,78 \dots -0,82$  в Поліссі влітку та восени.

Гідротермічний коефіцієнт Селянинова (ГТК) також добре корелює майже з усіма індексами, при цьому найтісніший зв'язок ( $r$  понад  $|0,90|$ ) спостерігається в літній період з індексом посушливості Педя ( $r = -0,95$ ). В квітні-червні та в серпні-жовтні в Степу ГТК найкраще корелює з індексами SPEI та SPI ( $r = 0,91-0,94$ ). Індекс Палмера загалом, має нижчі коефіцієнти кореляції з іншими параметрами в усіх агрокліматичних зонах.

В Лісостепу найбільш тісний кореляційний зв'язок спостерігається між індексами Педя та SPEI –  $r$  коливається від  $-0,93$  навесні до  $0,86$  восени. Також з  $S_a$  добре корелює індекс Палмера,  $r$  досягає значення  $-0,85$  влітку, що більше, ніж в інших зонах. ГТК має високі коефіцієнти кореляції з усіма індексами ( $r = |0,80-0,88|$ ) навесні та влітку, але восени тіснота зв'язку різко знижується.

В Поліссі загальна тіснота кореляційного зв'язку між індексами посух найслабша та досить різномірна по сезонах. В квітні-червні найвищі коефіцієнти кореляції спостерігаються між індексом Педя та SPEI, а також між ГТК та SPI:  $r$  становить  $-0,92$  та  $0,73$  відповідно. В червні-серпні гідротермічний коефіцієнт має найтісніший кореляційний зв'язок з усіма параметрами: коефіцієнт кореляції коливається від  $-0,84$  для індексу Педя і до  $0,68$  для індексу Палмера. Одночасно різко послаблюється кореляційний зв'язок між індексом Педя та SPI sc-PDSI – коефіцієнти кореляції стають незначущими (для 5% рівня вірогідності). В осінній сезон найбільш високими є коефіцієнти кореляції між індексами SPI та SPEI ( $0,90$ ), індексом Педя та SPEI ( $-0,82$ ), а також між ГТК та індексами Педя і SPEI ( $-0,72$  і  $0,77$  відповідно). Кореляційний зв'язок індексів посушливості з параметром Палмера в цей сезон зменшується навіть стає незначущим для  $S_a$  і ГТК.

Відмітимо, що в кореляційних матрицях для пари SPI-SPEI (масштаб три місяці) найвищий коефіцієнт кореляції спостерігається у серпні-жовтні в усіх агрокліматичних зонах. Враховуючі, що принцип розрахунку цих параметрів однаковий, можна зазначити, що в осінній період режим посух в значній мірі визначається саме режимом опадів, ніж в інші сезони, а внесок випаровування загалом зменшується. Оскільки стандартизований індекс опадів SPI рекомендовано ВМО до використання в якості єдиного показника посух національними метеорологічними службами [32], відмітимо, що цей індекс має високу тісноту кореляційного зв'язку з гідротермічним коефіцієнтом в Степовій зоні протягом всього вегетаційного сезону та протягом весни і літа в Лісостепу та Поліссі. Тобто SPI, незважаючи на відсутність врахування в ньому температурного режиму, добре відображує режим посухи, яка встановлюється через дефіцит опадів. До того ж, як можна бачити з табл. 2.12-2.14, кількість та інтенсивність посух, що виявляється за допомогою SPI, знаходиться в середніх межах порівняно з іншими індексами та має меншу регіональну мінливість, на відміну від ГТК, який в Степовій зоні перебільшує середню визначену кількість посух та їх інтенсивність, а в Лісостепу та Поліссі недооцінює, особливо навесні та влітку. Оскільки в Україні базовим показником є гідротермічний коефіцієнт Селянинова, можна рекомендувати доповнювати його аналіз хоча б одним з стандартизованих індексів опадів SPI або SPEI, які легко розраховуються локально за наявності довготривалих часових рядів станційних спостережень по опадах та температурі.

## Висновки до розділу 2

Аналіз полів ГТК за допомогою критеріїв аналогічності дозволив вперше визначити найбільш та найменш ймовірні місячні поля ГТК протягом вегетаційного періоду, а також отримати просторову динаміку посух по агрокліматичним зонам України для окремих сезонів.

З використанням сіткових даних індексу посушливості Педя, індексу суворості посух Палмера, стандартизованих індексів SPI та SPEI виконаний аналіз розповсюдженості посух по місяцях і сезонах в агрокліматичних зонах України. Вперше оцінено співвідношення індексів sc-PDSI, SPI та SPEI з показниками урожайності сільгоспкультур, яке показало можливість врахування впливу посух на продуктивність рослин через ці індекси. Були розраховані та проаналізовані деякі статистичні показники, які характеризують межі коливання розглянутих індексів в поточних кліматичних умовах на території країни.

Вперше виконано порівняльний аналіз п'яти індексів посух щодо їх інформативності і узгодженості у виявленні посух та створено каталог сезонних посух для основних агрокліматичних зон України за період 1995-2012 рр. Досліджуваний період характеризувався переважанням весняно-літніх посух, а загалом посушливими виявилися вегетаційні сезони 2007, 2009 та 2012 років.

## РОЗДІЛ 3

ПОВТОРЮВАНІСТЬ ПОСУХ В УКРАЇНІ У МАЙБУТНІХ КЛІМАТИЧНИХ  
УМОВАХ

## 3.1. Принципи та досягнення сучасного кліматичного моделювання

Як вже показано в попередніх розділах, частота появи посухи в Україні зазнає певних коливань в умовах окремих кліматичних періодів. Оцінка просторово-часового розподілу посух в майбутньому може бути здійснена на основі даних кліматичного моделювання Всесвітньої програми досліджень клімату.

До 2014 року напрями досліджень проєкцій змін клімату визначалися основними чотирма сюжетними лініями СДСВ (Спеціальна доповідь про сценарії викидів, [62]), в рамках яких розглядається низка можливих змін чисельності населення і економічної активності на протязі ХХІ століття [63]). Сценарії слугували також засобом для аналізу тих чинників, які можуть впливати на показники майбутніх викидів, а також для оцінки пов'язаних з ними невизначеностей. Кожна сюжетна лінія представляє різні демографічні, соціальні, економічні, технологічні і екологічні події та охоплює широкий перелік основних чинників, що визначають викиди парникових газів (ПГ) та сірки. Всі сценарії, засновані на одній сюжетній лінії, утворюють сценарну „сім'ю”. В рамках окремої сценарної „сім'ї” були розроблені два основних види сценаріїв: 1) сценарії з погодженими припущеннями щодо глобального населення, економічного зростання і кінцевого використання енергії; 2) сценарії з альтернативним кількісним визначенням сюжетної лінії [63-64]. В сценаріях А1 і В1 передбачається, що в світовій економіці домінуватиме глобальна торгівля і об'єднання, причому в сценарії А1 очікується найбільш швидкий зріст економіки на душу населення, в В1 – дещо повільніший. Сценарії В2 та А2 описують світ із постійно зростаючим населенням до 2100

року. В сценарії A2 економіка та управління регіонально орієнтовані, з найменшим приростом на душу населення, розвиток технологій найповільніший. В сценарії B2 економіка характеризується проміжним зростанням з підкресленими локальними рішеннями в економічній, соціальній та екологічній сферах. Технології мають більш швидкий розвиток, ніж в сценарії A2, але більш повільні і різноманітні, ніж в сценаріях A1, B1. Всі сценарії передбачають скорочення відмінностей в рівні доходів між різними регіонами, причому технологія буде такою ж важливою рушійною силою, як і демографія.

Прогнозована середня зміна глобальної температури за період 2090-2099 років (відносно періоду 1980-1999 рр.), згідно сценаріїв СДСВ, коливається від 1,8°C для сценарію B1 (ймовірний діапазон найкращої оцінки від 1,1 до 2,9°C) до 4,0°C для сценарію A1FI (ймовірний діапазон найкращої оцінки від 2,4 до 6,4°C). Очікується, що потепління буде найсильнішим над сушею в більшій частині високих широт північної півкулі, а найменш сильним - над Південним океаном і північними районами Атлантичного океану [63].

Стосовно розповсюдженості посушливих явищ у майбутньому, численні дослідження з використанням сценаріїв СДСВ дали такі оцінки. Глобальні тренди температури та опадів свідчать про загальне збільшення посушливості клімату протягом XXI століття, хоча в регіональному плані присутні різні кліматичні варіації. Так, збільшення частоти посушливих днів прогнозується за сценаріями A2 та A1B, але майже не змінюється за сценарієм B1 [65-66]. Доля земної поверхні, що буде охоплена екстремальною посухою, зростатиме від сучасних < 30% до 50% у 2100 році за сценарієм A2. Одночасно зі зростанням площі, охопленою посухою, будуть зростати у глобальному масштабі площі сільськогосподарських територій, що підвергатимуться посухам – за даними Лі [67], вони змінюватимуться від теперішніх 15% до 44% у 2100 році. В майбутньому очікується посилення посух в Центральній Європі, центральних районах США та Мексиці, в



південній Африці, на північному сході Бразилії [68]. За розрахунками Даї та ін. [22, 69], які використовували осереднені за десятиріччями sc-PDSI, до 2090-х років передбачається зростання посушливості в південній частині Європи, в більшості регіонів Африки, Північної Америки, Австралії, а також в південно-східній Азії. Відповідно до глобального зменшення кількості опадів та зростання температури і випаровуваності, прогнозується глобальне зниження вологовмісту ґрунту, що призведе до посух в тропічних та субтропічних регіонах Північної та Південної Америки, в Середземномор'ї, Австралії та західній Африці [70].

Аналіз SPI (на масштабі 3 та 12 місяців) передбачає інтенсифікацію посушливих умов в Центральній і Східній Європі у літньо-осінній період, та майже незмінні умови в зимовий та весняний сезони протягом XXI століття. Очікується збільшення тривалості сухих періодів та частоти дуже посушливих років [71-72]. Завдяки зміщенню на північ кліматичних зон в умовах регіонального потепління, в Центральній та Східній Європі очікується встановлення клімату, схожого на Середземноморській у теперішній час, негативними наслідками якого буде збільшення мінливості та інтенсивності літніх (конвективних) опадів, швидкої втрати вологи ґрунту навесні через сильний прогрів повітря та зменшення стоку річок під час весняного водопілля [73-74].

В 2014 році світовій спільноті були представлені матеріали П'ятої фази Проекту порівняння спільних моделей (ППСМ5) Всесвітньої програми досліджень клімату, в якій використовується новий набір сценаріїв, а саме Репрезентативні траєкторії концентрацій (РТК). Зробимо короткий огляд оцінки фізичних аспектів зміни клімату на основі П'ятої оціночної доповіді Міжурядової групи експертів по зміні клімату (МГЕЗК) [75]. Проекції змін у всіх компонентах кліматичної системи ґрунтуються на результатах модельних імітацій з використанням нового набору сценаріїв РТК, заснованих на концентраціях вуглецю в атмосфері, на відміну від сценаріїв викидів, що використовувалися в Четвертій оціночній доповіді [63]. Прогнозована зміна

клімату за сценаріями РТК є схожою з прогнозом за сценаріями викидів як за характером, так й величиною, з врахуванням відмінностей між сценаріями.

РТК визначаються приблизною сумарною величиною радіаційної дії (РД) в 2100 році в порівнянні з 1750 роком, яка дорівнює відповідно:

–2,6 Вт·м<sup>-2</sup> для РТК2.6;

–4,5 Вт·м<sup>-2</sup> для РТК4.5;

–6,0 Вт·м<sup>-2</sup> для РТК6.0;

–8,5 Вт·м<sup>-2</sup> для РТК8.5.

Радіаційна дія є мірою результуючої зміни енергетичного балансу системи Земля як реакції на деяке зовнішнє збурення, при цьому позитивна РД веде до потепління, а негативна РД до похолодання. Концепція РД є корисною для порівняння дії на середню глобальну температуру більшості окремих чинників, що впливають на радіаційний баланс Землі. РД має розмірність Вт·м<sup>-2</sup> і, як в попередніх оцінках МГЕЗК, відповідає зміні результуючого низхідного потоку (короткохвильовий + довгохвильовий) в тропопаузі після того, як стратосферні температури зможуть знов відновити радіаційну рівновагу, при цьому інші змінні стани, такі як температура тропосфери, водяна пара і хмарний покрив, залишаються зафіксованими на рівні їх незбурених значень.

З чотирьох нових сценаріїв один передбачає скорочення викидів з вельми низьким рівнем дії (РТК2.6), два сценарії передбачають стабілізацію викидів (РТК4.5 і РТК6.0) і один сценарій відповідає вельми високим рівням викидів парникових газів (РТК8.5). Згідно РТК6.0 і РТК8.5, радіаційна дія не досягає максимального значення до 2100 г.; в РТК2.6 вона досягає максимуму і потім знижується; в РТК4.5 вона стабілізується до 2100 р.

Кожен сценарій РТК має набори даних з високим просторовим дозволом по змінах в землекористуванні і викидах речовин, що забруднюють повітря, по секторах економіки, а також визначає річні концентрації парникових газів і антропогенні викиди до 2100 р. Тобто, на відміну від сценаріїв СДСВ, РТК можуть відображати результати цілого ряду напрямів

політичних заходів, що вживаються різними країнами в області клімату у XXI столітті.

Сценарії РТК засновані на комбінації комплексних оціночних моделей, простих кліматичних моделей і моделей хімії атмосфери та глобального вуглецевого циклу. Хоча РТК охоплюють широкий діапазон значень сукупних дій, вони не включають весь спектр викидів, особливо по аерозолях. Більшість розрахунків за моделями ППСМ5 і моделями системи Земля виконувалися із заданими рівнями концентрацій CO<sub>2</sub>.

Як зазначається в П'ятій оціночній доповіді [75], однією з головних проблем моделювання в рамках ППСМ5 стало послаблення тренду підвищення середньої глобальної приземної температури (СГПТ), яке спостерігалось в останні десятиліття. Спостереження показали, що залежно від набору даних спостережень, тренд СГПТ за період 1998-2012 рр. становить приблизно від третини до половини тренду за період 1951-2012 рр. Послаблення тренду СГПТ найбільш виразно проявляється взимку в Північній півкулі. Тим не менш, перше десятиліття XXI століття стало найбільш теплим, згідно інструментальних спостережень СГПТ.

Аналіз повного набору даних історичних імітаційних моделювань, виконаних в рамках ППСМ5 (з додаванням для періоду 2006-2012 рр. даних імітаційного моделювання РТК4.5), показав, що в 111 з 114 реалізацій тренд СГПТ за період 1998-2012 рр. вищий за спостережуваний і в середньому по ансамблю ППСМ5 становить 0,21°C за десятиліття. Передбачається, що періоди припинення тренду від 10 до 15 років можуть виникати в результаті прояву внутрішньої декадної мінливості клімату, яка інколи підсилює, а інколи нейтралізує довгострокові тренди, що знаходяться під зовнішнім впливом. Послаблення тренду СГПТ в 1998-2012 рр. пояснюється приблизно в рівній мірі чинником охолодження в результаті внутрішньої мінливості і послабленням тренду зовнішнього впливу. Послаблення тренду зовнішнього впливу, в першу чергу, відбувається як через негативний тренд дії вулканічних вивержень, так й за рахунок низхідної фази сонячного циклу.

Через низький ступінь вірогідності кількісного визначення ролі вказаних трендів слід відмітити, що практично жодне з імітаційних моделювань історичних даних в рамках ППСМ5 не відтворює спостережуване зараз припинення глобального потепління.

Розглянемо результати щодо очікуваних майбутніх змін клімату, наданих у Технічному резюме [75] з використанням термінів вірогідності, які базуються на оцінці відповідних доказів й узгодженості щодо висловлюваного висновку:

- практично визначено: ймовірність 99-100%;
- вельми ймовірно: ймовірність 90-100%;
- ймовірно: ймовірність 66-100%;
- майже так ймовірно, як й ні: ймовірність 33-66%;
- мало ймовірно: ймовірність 0-33%;
- вельми мало ймовірно: ймовірність 0-10%;
- виключно мало ймовірно: ймовірність 0-1%.

Отже, зміна середньої глобальної приземної температури у короткостроковій перспективі за період 2016–2035 рр. в порівнянні з 1986–2005 рр. буде, ймовірно, в діапазоні 0,3–0,7°C (рис. 3.1). Ця оцінка передбачає відсутність крупних вивержень вулканів або довготривалих змін сумарної сонячної радіації. У 2030 р. медіанні ансамблеві значення ППСМ5 для температури відрізняються не більше ніж на 0,2°C між сценаріями РТК, тоді як модельний розкид (визначений як діапазон від 17% до 83%) для кожного РТК складає близько 0,4 °C. Розкид між сценаріями збільшується з часом і до 2050 р. порівнянний з модельним розкидом.

На регіональному рівні, найбільші відмінності в приземній температурі повітря між сценаріями РТК виявляються в Арктиці. Вельми ймовірно, що антропогенне потепління приземного повітря протягом наступних декілька десятиліть відбуватиметься швидкішими темпами над сушею, ніж над океанами, а антропогенне потепління над Арктикою в зимовий час буде сильніше, ніж середнє глобальне потепління. Існує високий ступінь

ймовірності, що антропогенне потепління в порівнянні з базовим періодом буде сильнішим в тропіках і субтропіках, ніж в помірних широтах.

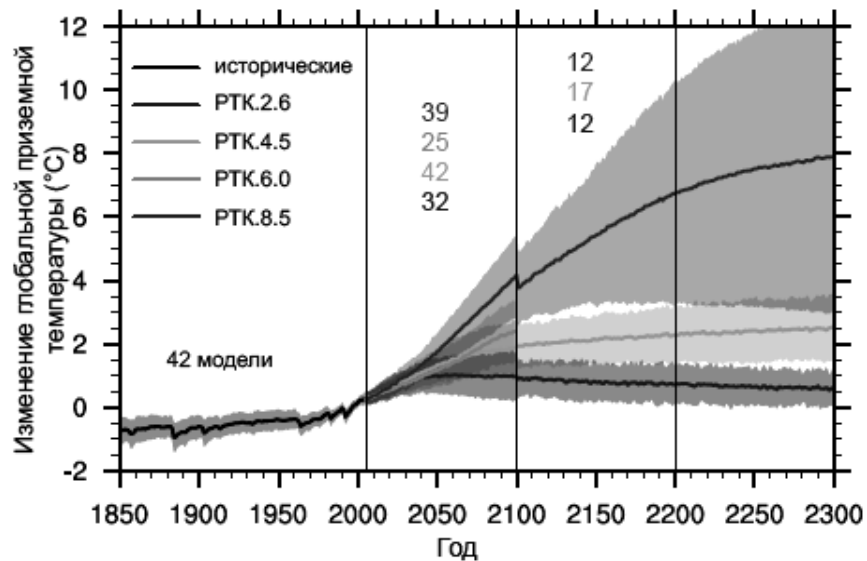


Рис. 3.1. Проєкції аномалій середньорічної глобальної приземної температури повітря (відносно 1986-2005 рр.) для сценаріїв РТК за результатами експериментів ППСМ5 для мультимодельного середнього (суцільні лінії) та стандартного відхилення 1,64 (5-95%) [75]

Практично визначено, що під час підвищення середніх глобальних температур над більшою частиною поверхні суші в добовому і сезонному часових масштабах частіше спостерігатимуться екстремально високі і рідше – екстремально низькі температури. Вельми ймовірно, що хвилі тепла наставатимуть частіше і будуть тривалішими. Як і раніше, у зимовий час подеколи спостерігатимуться екстремально низькі температури.

В довгостроковій перспективі середня глобальна температура продовжуватиме підвищуватися протягом XXI століття в рамках всіх сценаріїв РТК. Приблизно з середини XXI століття темпи глобального потепління стають більш залежними від сценарію (див. рис. 3.1). Відповідно до припущень у сценаріях РТК, СГПТ в період 2081-2100 рр. в порівнянні з 1986-2005 рр., ймовірно, буде знаходитися у 5-95% діапазоні моделей ППСМ5: від 0,3 до 1,7°C для РТК2.6; від 1,1 до 2,6°C для РТК4.5; від 1,4 до

3,1°C для РТК6.0; від 2,6 до 4,8°C для РТК8.5. Потепління вище за 4°C до 2081-2100 рр. мало ймовірно в рамках всіх РТК, за винятком РТК8.5, де потепління майже так ймовірно, як й ні.

Згідно проєкціям опадів, в кліматі, що теплішає, в глобальному масштабі очікується їх поступове збільшення в ХХІ столітті. Збільшення об'єму опадів буде значно менше (близько 2% K<sup>-1</sup>) темпів збільшення вмісту водяної пари в нижніх шарах тропосфери (близько 7% K<sup>-1</sup>) внаслідок глобальних енергетичних обмежень. Зміни середньої кількості опадів не будуть одноманітними і очікується, що в деяких регіонах відбуватиметься збільшення, а в інших зменшення опадів, або же не буде значних змін взагалі. У найближчій перспективі частота і інтенсивність сильних опадів над сушею, ймовірно, збільшиться. Ці зміни будуть зумовлені, в основному, збільшенням вмісту водяної пари в атмосфері і впливом змін в атмосферній циркуляції. Території у високих широтах ймовірно, отримають великі об'єми опадів у зв'язку з додатковим водоносним потенціалом теплішої тропосфери. В багатьох субтропічних посушливих і напівзасушливих регіонах, розташованих в середніх широтах, ймовірно, кількість опадів зменшиться. Найзначніші зміни опадів, очікуються в зимовий період над північною частиною Євразії і Північною Америкою. В подальшому, у міру підвищення середньої глобальної приземної температури та антропогенної дії, інтенсивність і повторюваність випадання екстремальних опадів над більшою частиною суші в середніх широтах і над вологими тропічними регіонами до кінця цього століття, вельми ймовірно, збільшиться.

Існує висока ймовірність того, що різниця в середньорічних опадах між посушливими і вологими регіонами і різниця між вологим і сухим сезонами збільшиться над значною частиною Земної кулі під впливом збільшення температури. За сценарієм РТК8.5, до кінця цього століття в багатьох посушливих і напівзасушливих регіонах помірних і субтропічних широт ймовірно, буде менше опадів, а в багатьох вологих регіонах помірних широт їх стане більше.

Відповідно до сценарію RTK8.5, до кінця століття підвищення ризику посух ймовірне в посушливих на даний час регіонах і пов'язане воно з прогнозованим зменшенням вологості ґрунту в масштабі від регіонального до глобального. Зниження вологості ґрунту буде найбільш істотним у Середземномор'ї, південно-західній частині США і південній частині Африки, що узгоджується з прогнозованими змінами в циркуляції Хедлі і підвищенням приземних температур.

Використовуючи дані кліматичного моделювання для певних територій та задач, слід пам'ятати про ключові невизначеності в проєкціях зміни глобального і регіонального клімату, зазначених в [75]. Згідно результатам моделювання, існує обмежена ймовірність передбачуваності середніх річних та десятирічних величин температури як у глобальному середньому, так і в деяких географічних регіонах. Мультимодельні результати по опадах показують в цілому погану передбачуваність. Існує середня міра вірогідності в короткострокових проєкціях зсуву на північ траєкторій штормових циклонів та західних вітрів в Північній півкулі. Короткострокова проєкція клімату також обмежена невизначеністю у проєкціях природної дії.

### 3.2. Аналіз температурного режиму та режиму опадів у теплий сезон періоду 2020-2050 рр.

Розглянемо результати кліматичного моделювання полів температури та опадів на території України в короткостроковій перспективі до 2050 р. Поля, що розглядаються, представлені мультимодельними даними з кроком регулярної сітки 2,5 градуси. Дані взяті для двох граничних кліматичних сценаріїв – м'якого RCP2.6 і жорсткого RCP8.5, та осереднені по теплому періоду року з квітня по жовтень.

Доступ до баз даних ППСМ5 (CMIP5) здійснений за допомогою сервісу Climate Explorer. Осереднення вихідних даних проведено по 32 глобальним моделям. Використання мультимодельного підходу до вирішення конкретних

задач щодо майбутніх кліматичних змін в певному регіоні неодноразово пропонувалося різними авторами [76-78]. Адже, через різні спрощення та припущення, схеми параметризацій, що використовуються у різних глобальних моделях, складно визначити кращу модель, яка б повністю описувала поведінку різних прогнозованих елементів. Верифікація окремих моделей проводиться зазвичай, для регіональних прогностичних схем, від яких вимагається відтворення прогностичних метеорологічних полів високої роздільної здатності [79]. Ансамбль з різних моделей використовує набір модельних експериментів зі структурно різних моделей, де кожна модель має одну (або більше) початкову ансамблеву умову. Невизначеність у використанні середньоансамблевих даних часто представлена стандартним відхиленням індивідуальних моделей, при цьому ансамблева медіана може перевищити ансамблеве середнє. Моделі в ансамблі також можуть бути взяті з вагами, якщо достатньо інформації для визначення певних ваг [80].

На рис. 3.2 та 3.3 представлені відповідно просторово-часові діаграми розподілу прогнозованих середніх за теплий сезон абсолютних аномалій приземної температури повітря та відносних аномалій інтенсивності опадів на трьох широтних колах ( $\varphi = 46, 48, 50^\circ$  пн.ш.) у довготних межах території України ( $\lambda = 21-44^\circ$  сх.д., вісь X на рисунках) за період з 2020 по 2050 рр. (вісь Y на рисунках). Базовий кліматичний період, відносно якого визначалися аномалії, взятий з 1981 по 2010 рр.

Як можна бачити на рис. 3.2, за обома кліматичними сценаріями на території країни очікується підвищення температури повітря впродовж тридцяти років. Але очевидна різниця між величиною та темпами зростання температури. За сценарієм RCP2.6 на всіх широтах відбуватиметься поступове зростання температури, при цьому до 2026 р. зріст повільний, а аномалії температури невеликі: до  $+0,5...+0,7^\circ\text{C}$ . В подальшому темп зростання збільшується і після невеликої паузи у 2043 р. аномалії температури досягатимуть максимуму до  $+2,1^\circ\text{C}$ .



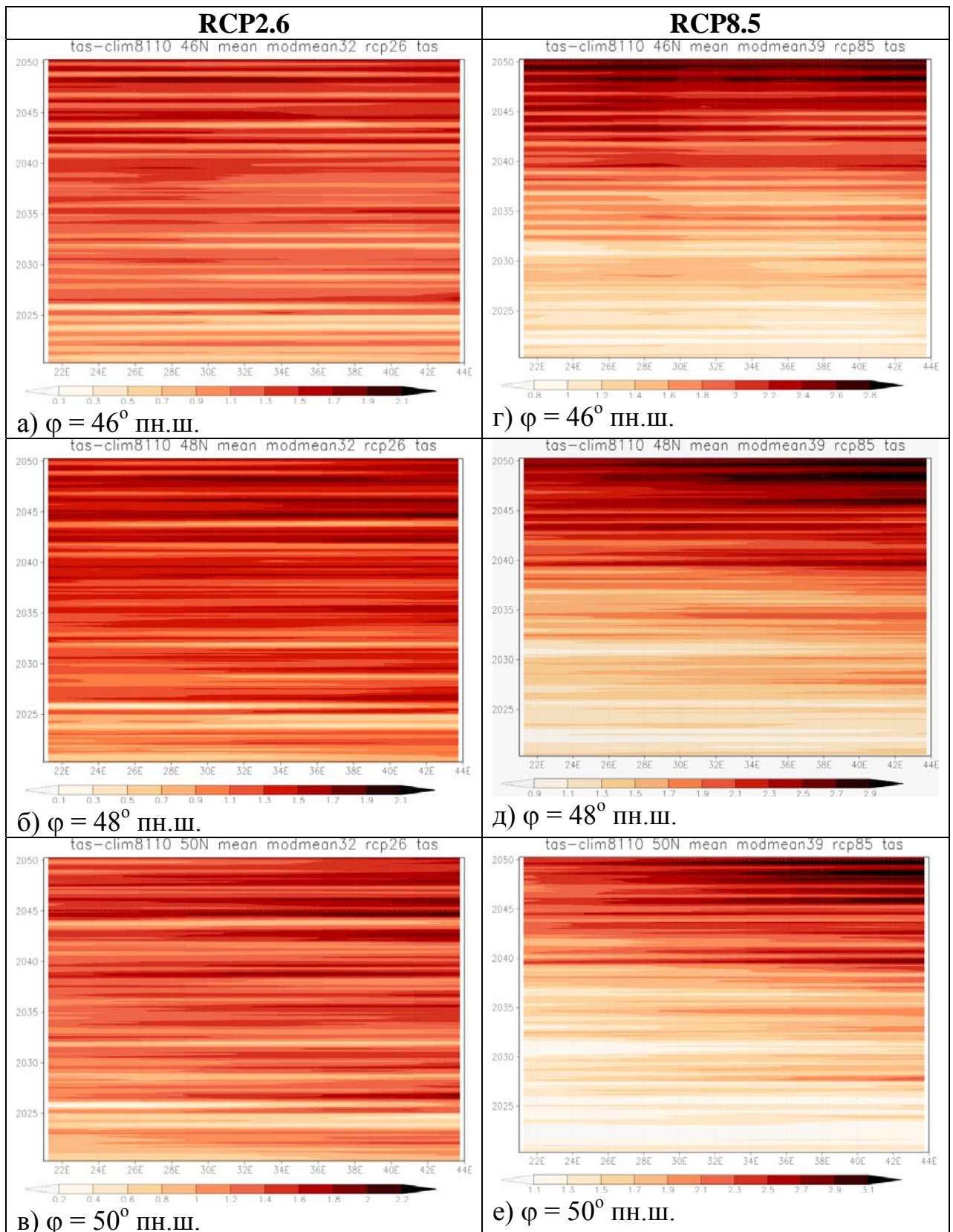


Рис. 3.2. Просторово-часовий розподіл аномалій приземної температури повітря ( $^{\circ}\text{C}$ , базовий період 1981-2010 рр.) за кліматичними сценаріями RCP2.6 та RCP8.5 на широтах  $46^\circ$  пн.ш. (а, г),  $48^\circ$  пн.ш. (б, д),  $50^\circ$  пн.ш. (в, е) у теплий сезон 2020-2050 рр.

Слід зазначити, що на широтах 48° та 50° пн.ш. більші позитивні аномалії спостерігаються в східній частині, від 32° до 44° сх.д., але на півдні (46° пн.ш.) зона найбільших аномалій температури зміщена на захід від 32° сх.д.

За сценарієм RCP8.5 до 2030 р. аномалії температури майже незмінні та коливаються в межах +0,8...+1,2 °С, і лише на сході в окремі роки досягатимуть +1,8 °С. Після 2033 р. на півдні та у 2036-2037 рр. в більш північних районах температура почне швидко зростати, і в п'ятиліття з 2045 по 2050 рр. аномалії температури будуть досягати +2,8...+3,1 °С, особливо в східній частині і на півночі. В південних районах аномалії температури розподіляться досить однорідно у виділених довготних межах.

Таким чином, у короткостроковій перспективі очікується загальне підвищення температури, яке торкнеться всіх областей України та особливо інтенсивним буде в північно-східному регіоні.

Зростання температури, як зазначалося в П'ятій оціночній доповіді [75], буде супроводжуватися загальним збільшенням кількості опадів, але не в усіх районах. В межах території України за двома кліматичними сценаріями, що розглядаються, будуть спостерігатися різноманітні тенденції у зміні інтенсивності і кількості опадів (рис. 3.3). За сценарієм RCP2.6 переважатиме зменшення опадів в усіх широтних зонах і особливо в центрі країни (рис. 3.3, б). В південній частині періоди зменшення опадів (до 6-8%) досить рівномірно перемежаються з періодами підвищення їх кількості (до 10-12%), що особливо помітно в східній частині досліджуваної області (рис. 3.3, а). В період 2034-2041 рр. аномалії інтенсивності опадів найменші або позитивні в усіх широтних зонах. Починаючи з 2043 р., кількість опадів стійко знижується в центральних та північних районах (рис. 3.3, б, в), в південній частині найбільш посушливим очікується 2043-2044 рр. з негативною аномалією опадів до 6-8%. Слід відзначити, що по всіх широтних зонах позитивні аномалії опадів на 4-8% вище за негативні.

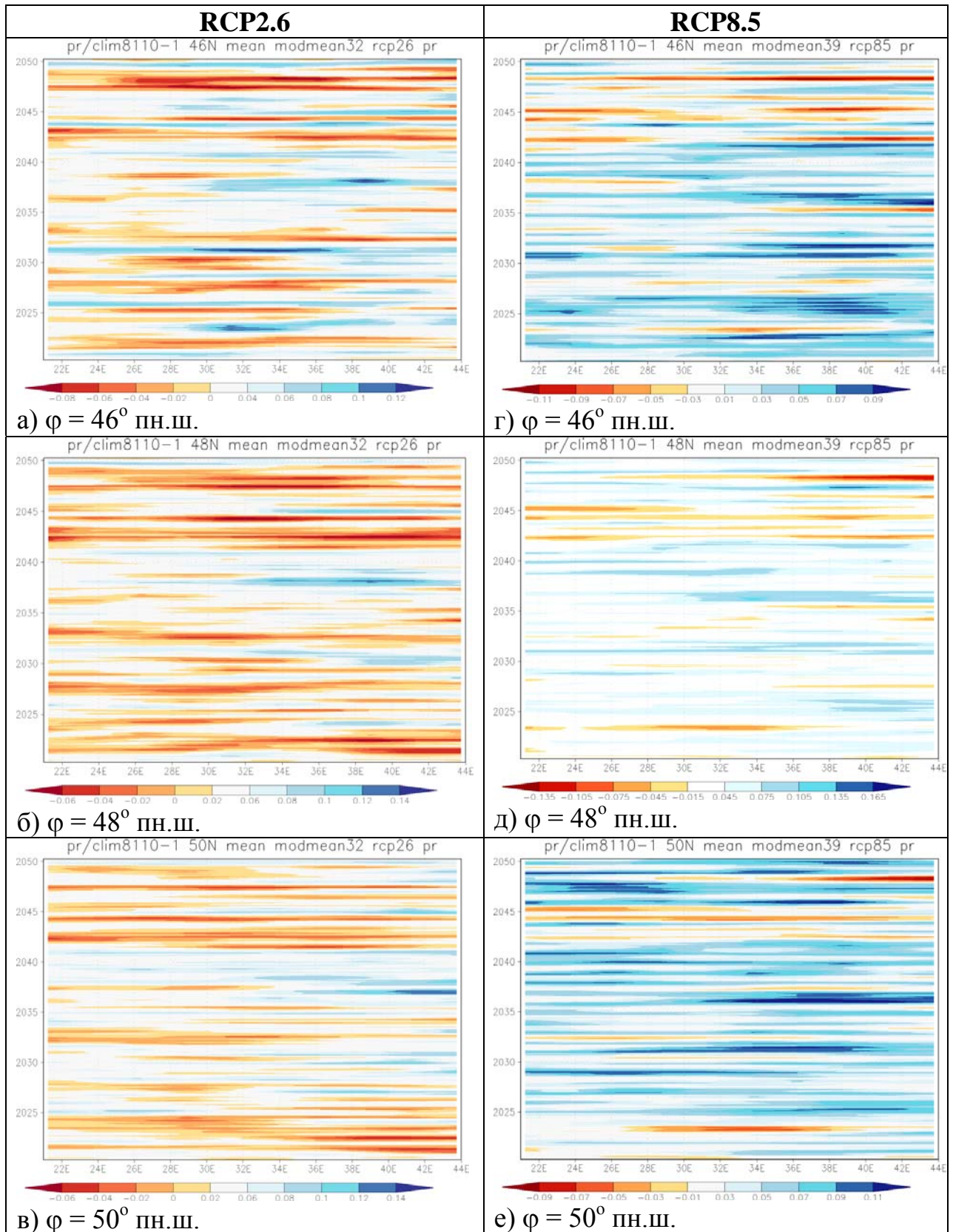


Рис. 3.3. Просторово-часовий розподіл відносних аномалій інтенсивності опадів (базовий період 1981-2010 рр.) за кліматичними сценаріями RCP2.6 та RCP8.5 на широтах  $46^\circ$  пн.ш. (а, г),  $48^\circ$  пн.ш. (б, д),  $50^\circ$  пн.ш. (в, е) у теплий сезон 2020-2050 рр.

Враховуючи постійне зростання температури повітря за сценарієм RCP2.6, прогнозоване зменшення кількості опадів у деякі періоди буде підвищувати ймовірність настання посух у теплий сезон року, особливо цей процес посилиться після 2045 р.

За кліматичним сценарієм RCP8.5, як можна бачити з рис. 3.3, г-е, по території України буде спостерігатися зростання кількості опадів в досліджуваний період. Позитивні аномалії інтенсивності опадів переважатимуть на півдні та в центрі майже до початку 2040-х років (рис. 3.3, г, д). На широті 48° пн.ш. очікуються найбільші значення позитивних аномалій – до 10-13%. На півночі (50° пн.ш.) виділяється всього два основних періоди зі зниженням кількості опадів – в 2023 р. та 2044-2045 рр., в інші проміжки часу переважатимуть позитивні аномалії до 9-11% (рис. 3.3, е). Таким чином, за сценарієм RCP8.5 на фоні значного зростання температури повітря в теплий період будуть збільшуватися й опади, що може знизити, формально, ймовірність утворення посух. Слід зазначити, що у теплий сезон на території України переважають зливові опади, які при високій інтенсивності мають невеликий період випадіння, тому часто не забезпечують необхідну зволоженість ґрунту. Високі прогнозовані температури зумовлять підвищення швидкості випаровування з поверхні, що зводить до мінімуму позитивний вплив збільшення кількості опадів. Тому, за даним сценарієм не слід очікувати будь-якого помітного зменшення кількості та інтенсивності посух порівняно з поточним кліматичним періодом.

### 3.3. Просторово-часовий розподіл посух у 2020-2050 рр.

Розглянемо прогнозований розподіл посух на території України у теплих сезонах 2020-2050 рр., ґрунтуючись на стандартизованому індексі опадів SPI, який був розрахований з використанням мультимодельних даних по опадах на різних часових масштабах [81].

### 3.3.1. Сезонні посухи

Аналіз просторового розподілу і повторюваності сезонних посух, які визначалися за індексом SPI7 з квітня по жовтень впродовж 2020-2050 рр., показав, що в межах території України загальна кількість посух дещо вище за сценарієм RCP2.6, ніж за жорстким сценарієм RCP8.5 (рис. 3.4). За сценарієм RCP2.6 по території країни сезонні посухи прогнозуються в середньому у 48-56% всіх років, тобто майже кожний другий сезон буде посушливим.

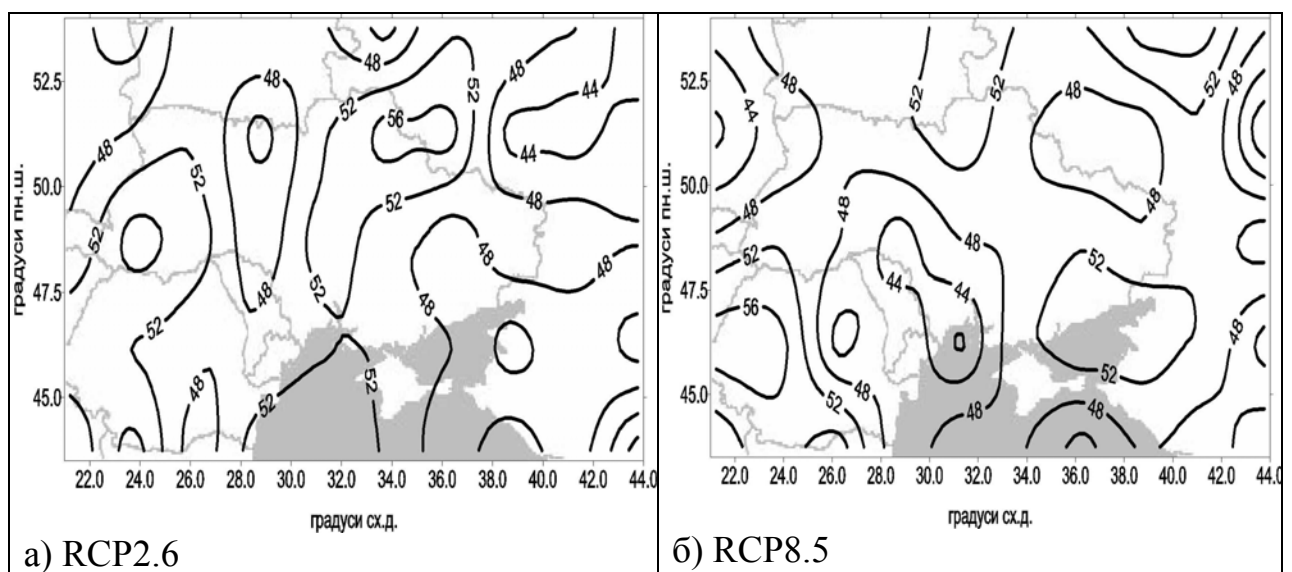


Рис. 3.4. Загальна повторюваність посух ( $SPI < 0$ , %) у теплий сезон за сценаріями RCP2.6 (а) та RCP8.5 (б) в період 2020-2050 рр.

Найбільша повторюваність посух (понад 56%) спостерігається в північно-східних областях та в Карпатському регіоні (понад 54% років) (рис. 3.4, а). За сценарієм RCP8.5 загальна повторюваність посух по території країни складає переважно 44-52% (рис. 3.4, б), при цьому найбільша повторюваність (понад 52%) спостерігається в Приазов'ї, Закарпатті та на крайній півночі (Київська та Чернігівська області). Мінімум сезонних посух (менше 48%) припадає на південний захід країни – Одеська, Миколаївська, Вінницька області.

Кількість років з м'якою посухою за сценарієм RCP2.6 коливається у межах 10-12, з максимумом над північними областями України, Херсонською областю та Карпатами (рис. 3.5, а). За сценарієм RCP8.5 кількість років з м'якою посухою становить в середньому 8-10 (рис. 3.5, д), більше 12 років з посухою прогнозується в Закарпатті та вздовж узбережжя Азовського моря.

Помірно посушливі теплі сезони за сценарієм RCP2.6 прогнозуються у кількості 1-2 роки на більшій частині території країни, і тільки на сході (Луганська область) кількість років збільшується до чотирьох (рис. 3.5, б). За сценарієм RCP8.5 сезонів з помірними посухами вдвічі більше – від 2 до 4 по країні, при цьому максимум припадає на південно-західні та північні області (рис. 3.5, е).

Кількість років з сильними сезонними посухами за обома сценаріями прогнозується від 1 до 3, при цьому максимум повторюваності зосереджений в обох випадках на південному заході і охоплює Одеську, Миколаївську, Черкаську, Вінницьку, Кіровоградську області (рис. 3.5, в, ж). На решті території країни повторюваність коливається від 0 до 1 року.

Екстремальні сезонні посухи за сценарієм RCP2.6 очікуються не більше 1 разу за 31 рік на більшій частині території країни і лише у Волинській області можливі два роки (рис. 3.5, г). За сценарієм RCP8.5 екстремальних посух прогнозується більше, при цьому спостерігаються два осередки повторюваності в 1-2 роки – один на заході країни, інший – в північно-східних та центральних областях (рис. 3.5, з).

Таким чином, у теплі сезони 2020-2050 рр. за обома сценаріями очікується, що майже кожний третій сезон буде з м'якою посухою майже на всій території країни. В середньому буде спостерігатися від 1 до 3 сезонів з помірною та сильною посухою і не більше 1 або 2 сезонів з екстремальною посухою. В більш жорсткому сценарії RCP8.5 загалом, прогнозується більше помірних та сильних сезонних посух, в сценарії RCP2.6 переважатимуть м'які посухи.

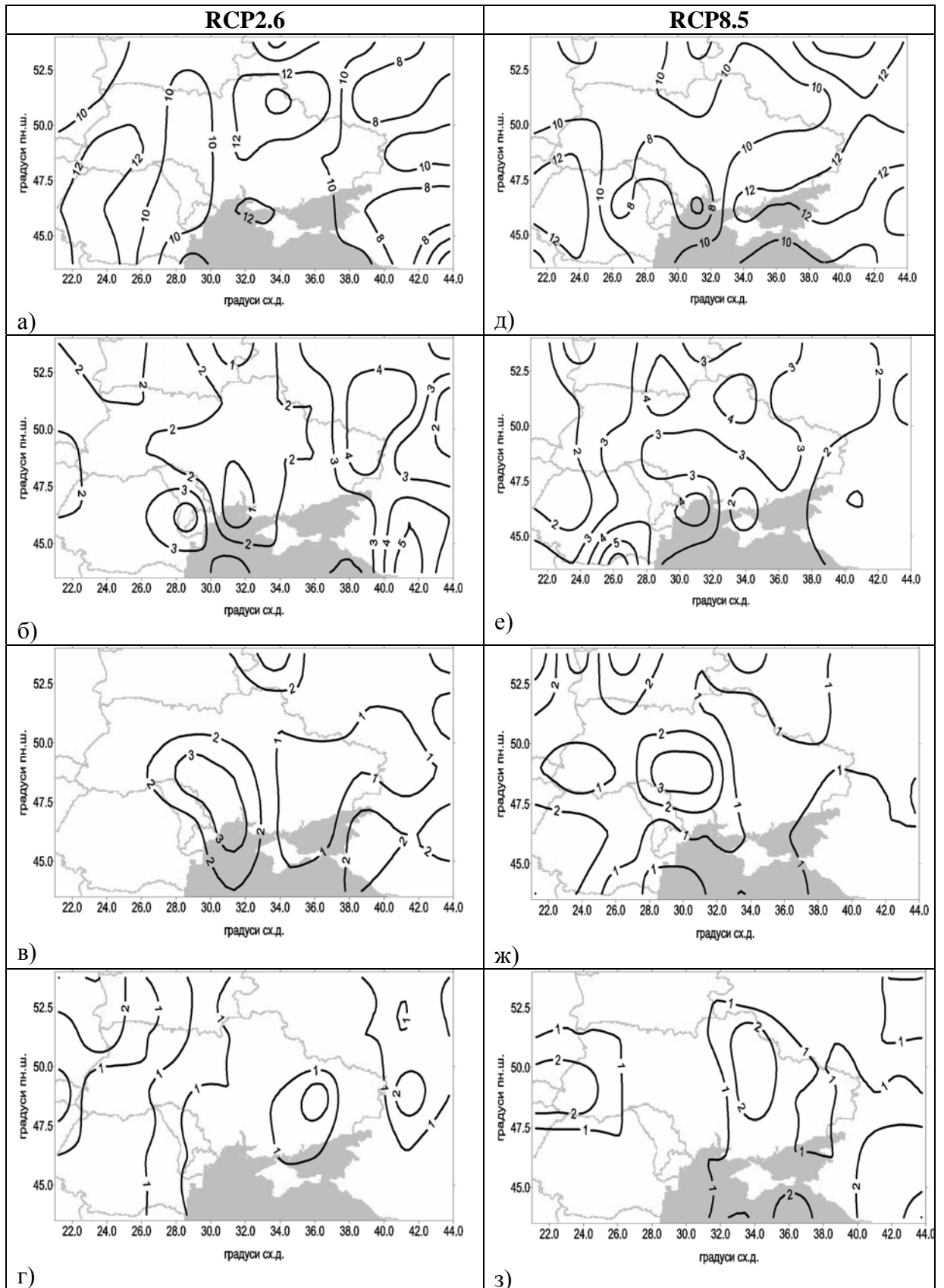


Рис. 3.5. Повторюваність посух (кількість років) різної інтенсивності у теплий сезон за кліматичними сценаріями RCP2.6 та RCP8.5 в період 2020-2050 рр.: (а), (д) – слабкі посухи; (б), (е) – помірні посухи; (в), (ж) – сильні посухи; (г), (з) – екстремальні посухи

### 3.3.2. Весняно-літні посухи

Просторовий розподіл повторюваності весняно-літніх посух (квітень-червень) за двома сценаріями суттєво різняться (рис. 3.6). За сценарієм RCP2.6 середня повторюваність по території країни коливається в межах 44-52%, тобто майже кожна друга весна прогнозується посушливою (рис. 3.6, а). При цьому вузька смуга підвищеної повторюваності посух (понад 52%) проходить з півночі (Житомирська область) на південний захід (Одеська область), а також охоплює Крим. На решті території повторюваність посух знижується до 44% і менше. За сценарієм RCP8.5 розподіл більш однорідний, максимум сезонних посух прогнозується в північних областях (понад 52%), а також на крайньому півдні країни (рис. 3.6, б). На решті території середня повторюваність посух становить 44-48%.

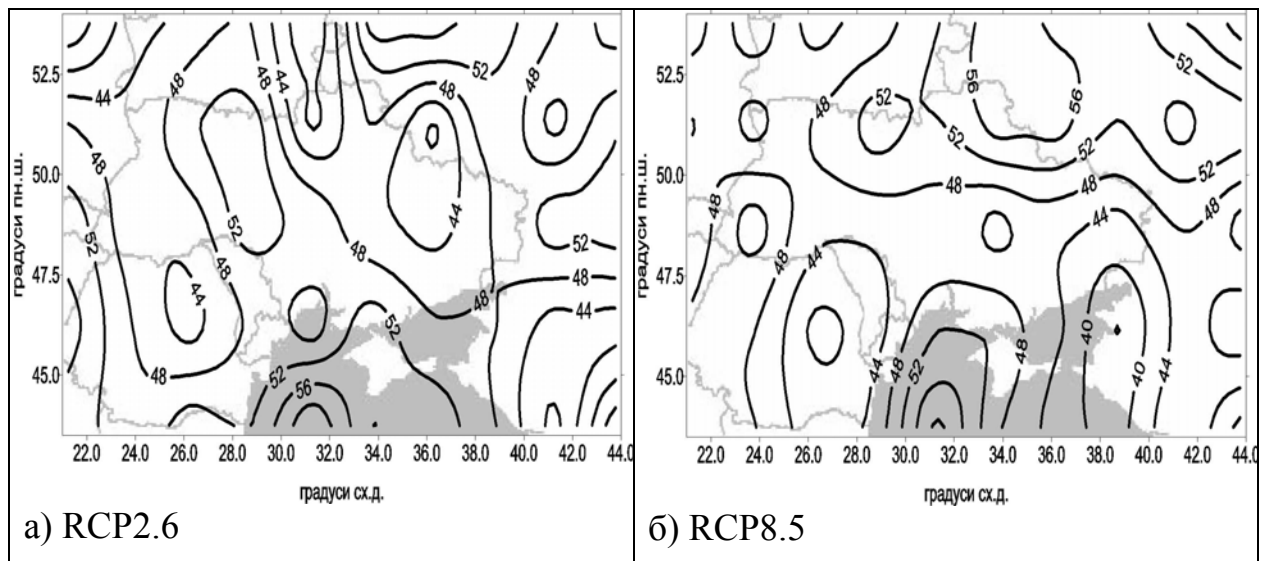


Рис. 3.6. Загальна повторюваність весняно-літніх посух ( $SPI < 0$ , %) за сценаріями RCP2.6 (а) та RCP8.5 (б) в період 2020-2050 рр.

М'які весняно-літні посухи переважають в сценарії RCP2.6 – вони прогноуються у 8-12 роках (рис. 3.7, а), при цьому максимум розташований в тих же областях, що і в загальному розподілі (див. рис. 3.6, а). За сценарієм RCP8.5 в більшості областей кількість років з весняно-літньою посухою



коливається від 7 до 9, а мінімум повторюваності знаходиться в центрі країни (рис. 3.7, д). І лише на крайньому північному сході (Харківська, Сумська області) кількість років з посухою підвищується до 12-13.

Розподіл помірних весняно-літніх посух за сценарієм RCP2.6 характеризується максимумом повторюваності від 3 років в східних областях і районі Карпат та мінімумом (до 1 року) на південному заході (рис. 3.7, б). На решті території прогнозується близько 2 років з помірними посухами. В жорсткому сценарії RCP8.5 років з помірними посухами більше, максимальна їх кількість - 4-5 роки, прогнозується в центрі країни. В західних областях кількість помірних посух зменшується до 3 років, а в північно-східній частині до 1-2 років (рис. 3.7, е).

Кількість років з сильними весняно-літніми посухами по території країни коливається в межах 1-2 роки за обома сценаріями (рис. 3.7, в, ж). Але в сценарії RCP2.6 прогнозується максимум в 3 роки у Волинській та Львівській областях (рис. 3.7, в), тоді як в жорсткому сценарії RCP8.5 максимум (2 роки) зміщений на Карпатський регіон. Другий максимум ( $\geq 2$  років) в обох сценаріях займає Вінницьку, Черкаську, Одеську, Миколаївську та Кіровоградську області.

Повторюваність екстремальних весняно-літніх посух прогнозується в середньому не більше 1 разу за 31 рік за обома сценаріями (рис. 3.7, г, з). При цьому вони найбільш ймовірні в західних та східних областях ( $\geq 1$  рік), а в центральній частині їх повторюваність близька до нуля.

Таким чином, за умови реалізації м'якого сценарію RCP2.6 очікується настання м'яких весняно-літніх посух з повторюваністю раз на три роки. Більш інтенсивні посухи спостерігатимуться не більше ніж у 6-7 роках за весь період. За жорсткого сценарію RCP8.5 при зменшенні кількості м'яких посух збільшиться кількість помірних, які вкупі з сильними та екстремальними складуть до 8 випадків за період 2020-2050 рр.

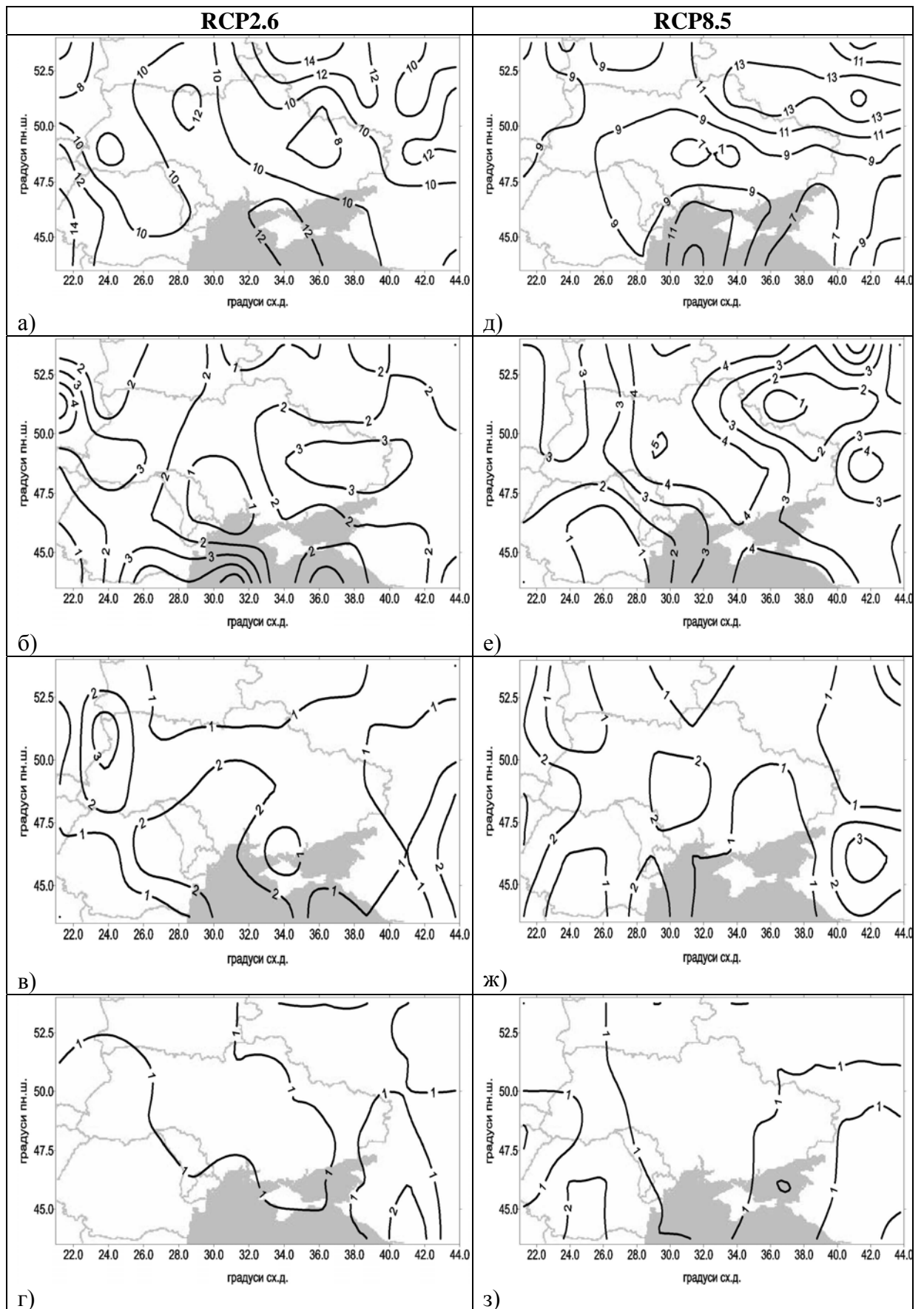


Рис. 3.7. Повторюваність весняно-літніх посух (кількість років) різної інтенсивності за кліматичними сценаріями RCP2.6 та RCP8.5 в період 2020-2050 рр.: (а), (д) – слабкі посухи; (б), (е) – помірні посухи; (в), (ж) – сильні посухи; (г), (з) – екстремальні посухи

### 3.3.3. Літні посухи

Загальна повторюваність літніх посух за сценарієм RCP2.6 є меншою, ніж весняно-літніх, та ніж за сценарієм RCP8.5, а просторовий розподіл осередків повторюваності має меридіональну спрямованість (рис. 3.8, а). У західній, північній та східній частинах країни повторюваність не перевищує 48% всіх років, а в центрі та на півдні формується максимум, де повторюваність посух перевищує 50%, при цьому найбільш посушливими будуть Херсонська область та західна частина Кримського півострова. Тобто, за м'яким сценарієм по території країни літні посухи будь-якої інтенсивності передбачаються раз на три або чотири роки. За жорстким сценарієм RCP8.5 розподіл повторюваності літніх посух досить однорідний (рис. 3.8, б), на значній частині території вона складає близько 50%, а на крайньому сході та Буковині підвищується до 54-56%. Тобто, за цим сценарієм кожного другого року очікується поява літньої посухи.

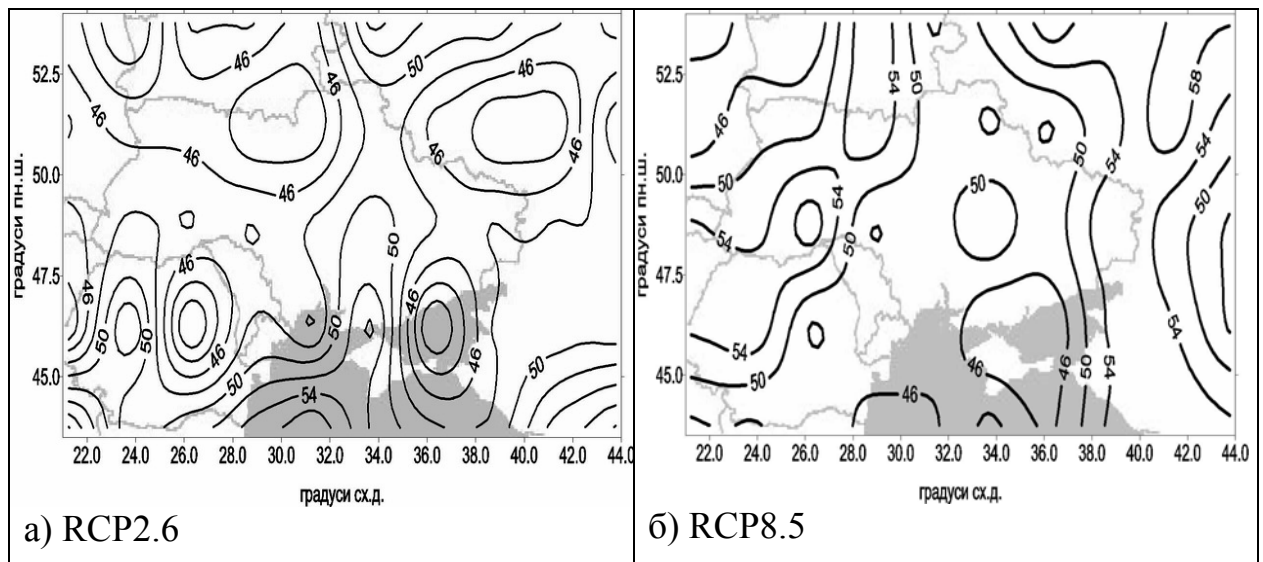


Рис. 3.8. Загальна повторюваність літніх посух ( $SPI < 0$ , %) за сценаріями RCP2.6 (а) та RCP8.5 (б) в період 2020-2050 рр.

М'які літні посухи переважатимуть в Україні за сценарієм RCP8.5: у західних, центральних, північних областях та на сході їх кількість очікується

у межах 10-12 випадків (рис. 3.9, б). В Харківській, Дніпропетровській, Херсонській, Миколаївській, Одеській областях та Криму кількість м'яких посух знижується до 8 випадків й менше. За сценарієм RCP2.6 по Україні кількість років з м'якими посухами коливатиметься від 5 до 9, з максимумом на крайньому заході та сході й мінімумом в Київській та Одеській областях (рис. 3.9, а).

Просторовий розподіл помірних посух влітку за обома сценаріями є схожим: простежуються два максимуми повторюваності – в західній половині країни з 3-4 випадками та більш інтенсивний в східній половині (рис. 3.9, б, е), де за сценарієм RCP2.6 кількість випадків досягає 6, а за сценарієм RCP8.5 – 8 років. В жорсткому сценарії також простежується вторинний максимум в Херсонській області, в районі Перекопського перешийку.

Кількість сильних літніх посух за сценарієм RCP2.6 очікується не більше одного випадку за 31 рік на значній частині території країни (рис. 3.9, в). І лише на крайньому сході, південному заході та в Криму прогнозується до двох випадків. За сценарієм RCP8.5 в центральних та південно-західних областях, а також Приазов'ї кількість сильних посух може перевищити 2 випадки, на решті території країни – не більше одного випадку (рис. 3.9, ж).

Екстремальні посухи за обома сценаріями влітку не очікуються у більшості областей України (рис. 3.9, г, з). За сценарієм RCP2.6 екстремальні посухи (не більше 1 випадку) прогнозуються лише в західних областях – Львівській, Івано-Франківській, Тернопільській, Ровенській, Волинській та на Закарпатті. У сценарії RCP8.5 виникнення по одному випадку екстремальних посух можливе, окрім перелічених областей, на півдні Одеської області та в Луганській області.

Отже, м'які літні посухи за сценарієм RCP2.6 можна очікувати в Україні з повторюваністю раз на п'ять років, ще в трьох-п'яти роках за весь період можуть виникнути помірні посухи і в 1-2 роках сильні та екстремальні посухи.

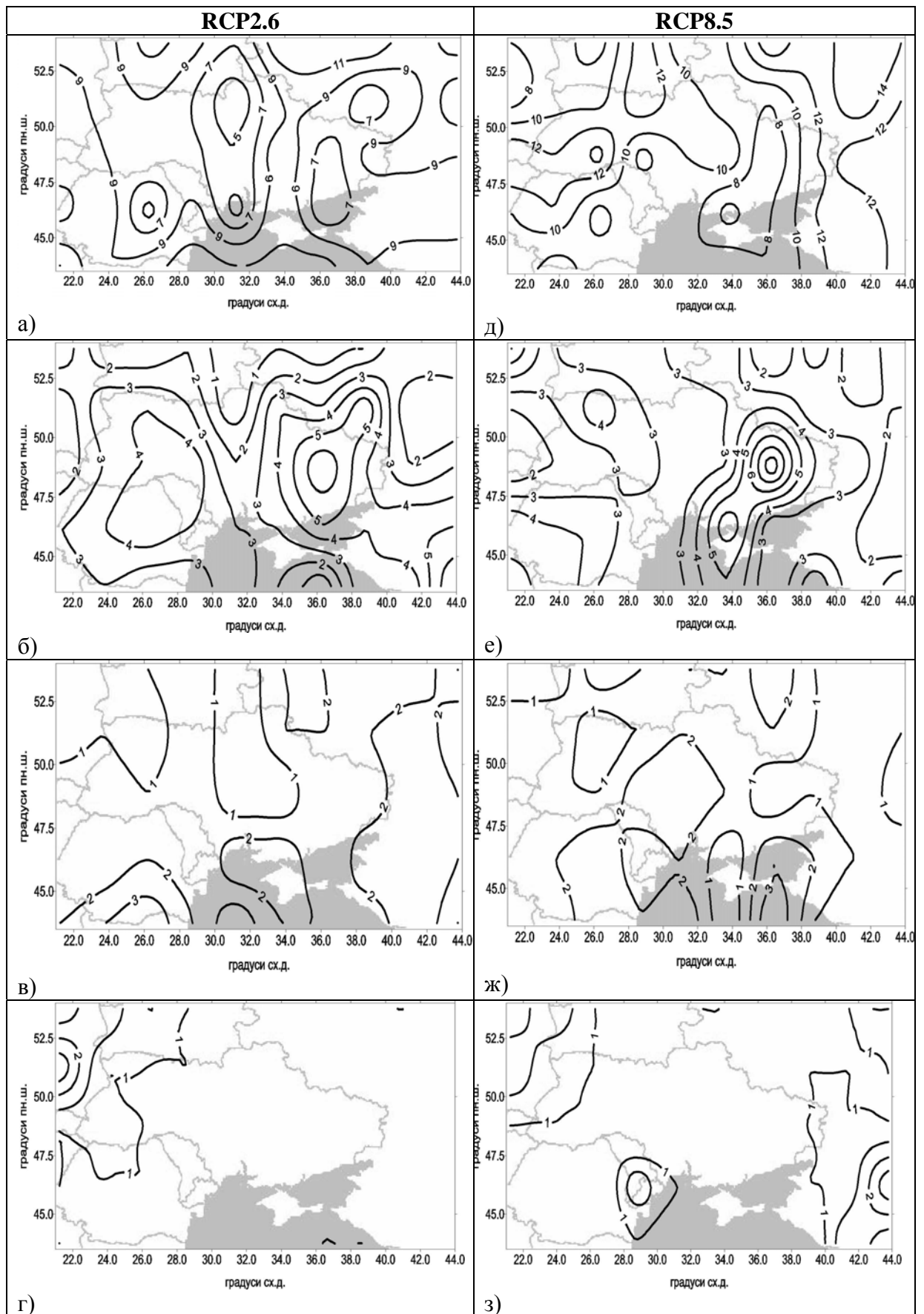


Рис. 3.9. Повторюваність літніх посух (кількість років) різної інтенсивності за кліматичними сценаріями RCP2.6 та RCP8.5 в період 2020-2050 рр.: (а), (д) – слабкі посухи; (б), (е) – помірні посухи; (в), (ж) – сильні посухи; (г), (з) – екстремальні посухи

За сценарієм RCP8.5 м'які посухи будуть виникати в середньому кожні три роки, помірні – кожні 7-8 років. Кількість сильних та екстремальних посух в деяких районах досягне 2 випадків за весь період.

### 3.3.4. Літньо-осінні посухи

Загальна повторюваність літньо-осінніх посух за обома сценаріями прогнозується вищою за повторюваність літніх посух, а в деяких районах вищою за весняно-літні посухи (рис. 3.10). За сценарієм RCP2.6 максимум повторюваності (понад 56%) спостерігається в північно-східних областях (Харківська, Сумська) та розповсюджується на центральні області (Дніпропетровська, Кіровоградська, Черкаська) (рис. 3.10, а). В західній половині України і на півдні повторюваність не перевищує 48%, а на крайньому заході підвищується до 52%.

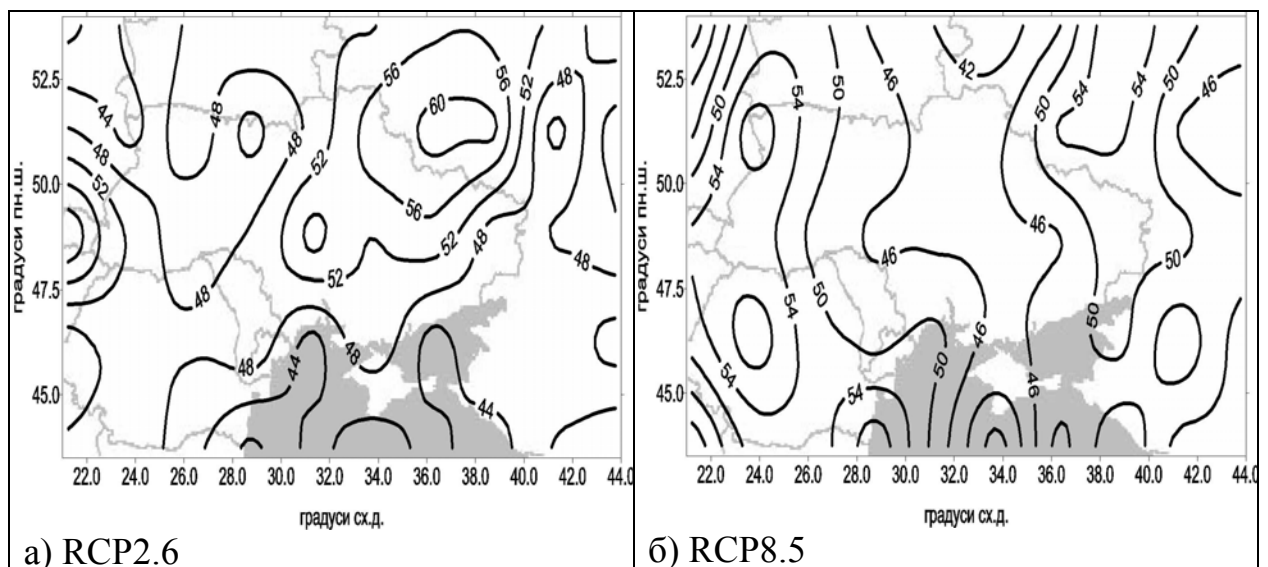


Рис. 3.10. Загальна повторюваність літньо-осінніх посух (SPI < 0, %) за сценаріями RCP2.6 (а) та RCP8.5 (б) в період 2020-2050 рр.

За жорстким сценарієм RCP8.5 розподіл осередків повторюваності має меридіональний характер, внаслідок чого зони підвищеної повторюваності осінніх посух (понад 50%) займають західні та східні області, а в центрі

країни повторюваність знижується до 46% та менше (рис. 3.10, б). Таким чином, осінні посухи за обома сценаріями можуть спостерігатися в Україні кожний другий рік, а в деяких областях й частіше.

Повторюваність м'яких літньо-осінніх посух за сценарієм RCP2.6 передбачається вищою по всій території порівняно зі сценарієм RCP8.5 (рис. 3.11, а, д). Осередок максимальної повторюваності знаходиться на північному сході (понад 14 випадків в Харківській та Сумській областях) і розповсюджується майже на всю східну половину України (рис. 3.11, а). У західній половині повторюваність в середньому складає 8-10 років і лише на Закарпатті підвищується до 12 випадків. За сценарієм RCP8.5 кількість м'яких посух в більшості областей не перевищує 8-10 випадків (мінімум в центрі країни), в західних областях – до 12 випадків (рис. 3.11, д).

Кількість помірних літньо-осінніх посух за сценарієм RCP2.6 в більшості областей становить 1-2 випадки, але простежується вузька смуга підвищеної повторюваності, яка проходить меридіонально через Одеську, Вінницьку, Житомирську, Черкаську, Київську області, де кількість посух зростає до 4-5 випадків (рис. 3.11, б). За сценарієм RCP8.5 помірних посух по всіх областях прогнозується трохи більше – в середньому 3-4 випадки (рис. 3.11, е). Максимум припадає на Волинську і Рівненську області (до 5-6 випадків), а мінімальна повторюваність (до 2-3 випадків) прогнозується в Північному Причорномор'ї.

Сильні літньо-осінні посухи за сценарієм RCP2.6 передбачаються з вищою повторюваністю: в західній половині та на півдні України кількість випадків досягатиме 2-3 за 31 рік, а в східній частині – не більше одного (рис. 3.11, в). За сценарієм RCP8.5 повторюваність сильних посух невелика і в межах країни не перевищуватиме 1 випадок (рис. 3.11, ж).

Кількість років з екстремальними посухами за обома сценаріями коливається в межах 1-2 випадків, але осередки максимальної повторюваності розташовані в різних районах (рис. 3.11, г, з).

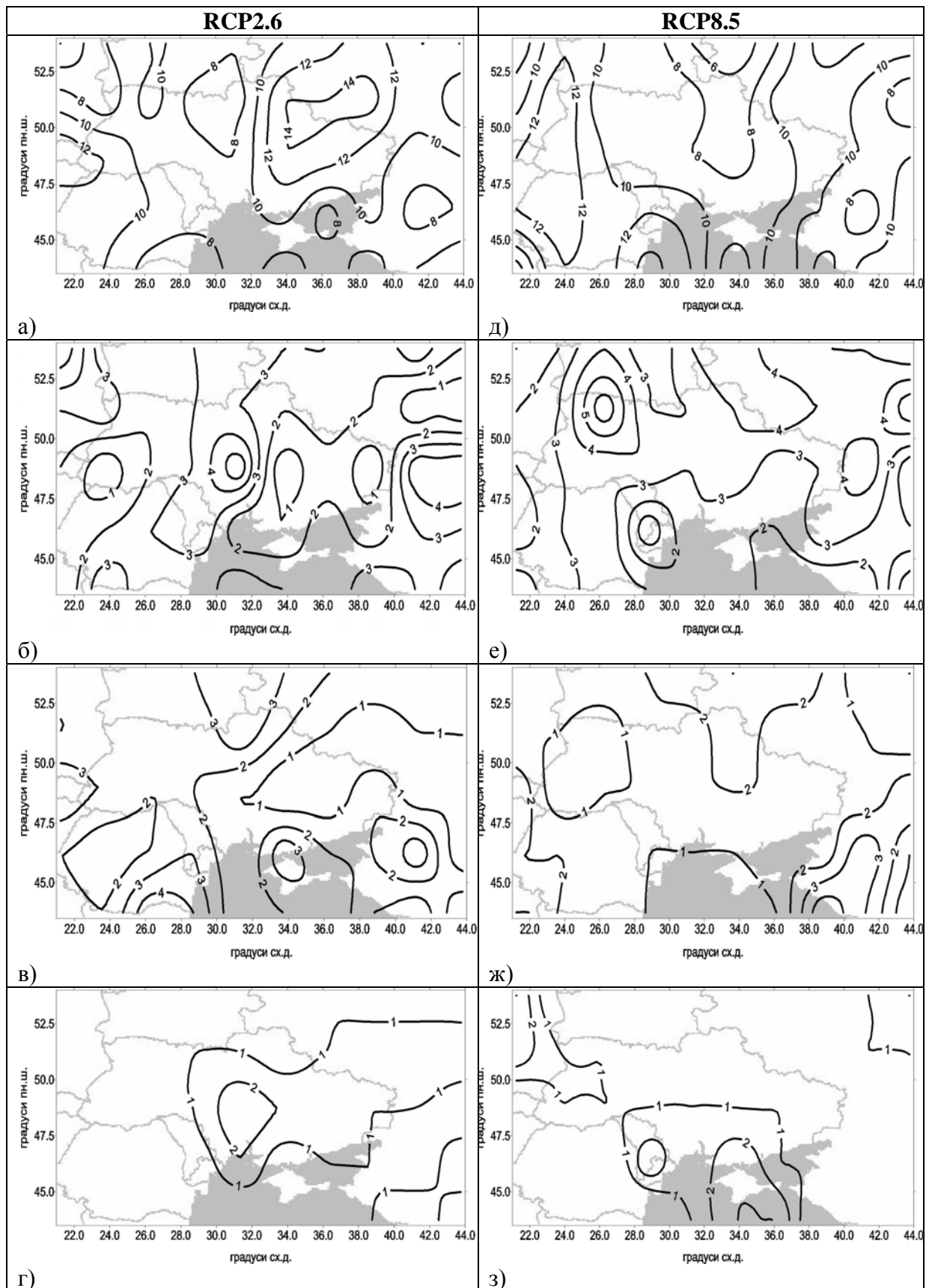


Рис. 3.11. Повторюваність літньо-осінніх посух (кількість років) різної інтенсивності за кліматичними сценаріями RCP2.6 та RCP8.5 в період 2020-2050 рр.: (а), (д) – слабкі посухи; (б), (е) – помірні посухи; (в), (ж) – сильні посухи; (г), (з) – екстремальні посухи



Для сценарію RCP2.6 максимум повторюваності екстремальних посух зосереджений над Одеською, Вінницькою, Миколаївською та Черкаською областями (рис. 3.11, г), а осередок з кількістю випадків  $\geq 1$  поширюється на схід. В сценарії RCP8.5 зони повторюваності екстремальних посух з кількістю випадків  $\geq 1$  займають південні області країни, з максимумом в Херсонській області та АР Крим (рис. 3.11, з). Вторинний максимум повторюваності спостерігається в західних областях.

Таким чином, за сценарієм RCP2.6 в період 2020-2050 рр. м'які літньо-осінні посухи будуть спостерігатися кожні 2-3 роки, помірні – не більше 1 разу в 8-10 років. Сумарна кількість сильних та екстремальних посух не перевищуватиме 3-4 випадки за весь період. За сценарієм RCP8.5 м'які посухи можна очікувати кожні 3-4 роки, помірні – кожні 8-10 років, а кількість сильних та екстремальних не перевищить 1-2 випадків в більшості областей України.

Проведений аналіз повторюваності посух різної інтенсивності та в різні сезони протягом вегетаційного періоду показав, що за м'яким і жорстким кліматичними сценаріями в Україні в період 2020-2050 рр. очікується невелике збільшення загальної кількості посух, при цьому відбуватиметься їх перерозподіл в межах теплого сезону. На теперішній час (1995-2012 рр.) в Україні переважають весняні та літні посухи, повторюваність осінніх дещо менша. Середня періодичність появи посух будь-якої інтенсивності в кожному з трьох сезонів року наразі в Степу становить раз на 2-3 роки, в Лісостепу – раз на 4-6 років, в Поліссі – раз на 4-9 років. В період до 2050 р. прогнозується збільшення кількості літньо-осінніх посух та зменшення літніх, особливо за м'яким сценарієм RCP2.6, періодичність яких може досягнути раз на 2-3 роки по всіх областях країни. Окрім того, слід відмітити, що осередок максимальної повторюваності посух в усі сезони часто прогнозується на північному сході країни та в західних областях, тобто в Лісостеповій зоні, яка в сучасному кліматі не є дуже посушливою. Збільшення відбуватиметься за рахунок, в основному, м'яких посух. В Степу, навпаки, загальна кількість

посух майже не змінюватиметься, при цьому зберігатиметься більш висока ймовірність настання сильних та екстремальних посух, ніж в інших агрокліматичних зонах.

### 3.3.5. Часовий хід посух протягом 2020-2050 рр.

Розглянемо, як розподілятимуться за часом посушливі / вологі періоди в 2020-2050 рр. по окремих точках, які наближені до певних пунктів України [81]. На рис. 3.12 представлені графіки часового ходу індексу SPI на масштабі 12 місяців, розрахованого по двом кліматичним сценаріям в чотирьох точках, розташованих у різних агрокліматичних зонах. Пряма лінія на графіках відображує тренд індексу SPI12.

На заході країни (Львів) за м'яким сценарієм RCP2.6 спостерігатимуться періодичні коливання від сухих до вологих періодів (рис. 3.12, а). Основні посушливі періоди траплятимуться з 2021 по 2025 рр., з 2027 по 2029 рр., з 2032 по 2034 рр., з 2042 по 2049 рр. (за виключенням 2047 р.). При цьому, якщо в період з 2021 по 2034 рр. посухи досягатимуть критеріїв від помірних до сильних, то в останній період інтенсивність посух посилиться до екстремальних значень. За жорстким сценарієм RCP8.5 очікується значно сприятливіша ситуація – до 2042 р. спостерігатимуться лише чотири посушливі епізоди тривалістю близько 1 року – 2021, 2024, 2030 та 2039 рр. (рис. 3.12, д). Інтенсивність посух в трьох перших роках не перевищуватиме критерію помірних, в останньому випадку очікується слабка посуха. З 2042 по 2046 рр. очікується настання тривалої та інтенсивної посухи, протягом якої двічі наступатимуть періоди екстремальних значень ( $SPI_{12} < -3$ ).

На півдні країни (Одеса) за умови реалізації сценарію RCP2.6, як й на заході, будуть спостерігатися чергування сухих та вологих епізодів протягом досліджуваного періоду (рис. 3.12, б). З 2020 по 2034 рр. спостерігатимуться п'ять посушливих періодів з інтервалом кожні два роки. Інтенсивність посухи коливатиметься від помірної до сильної (2022, 2028, 2030 рр.).

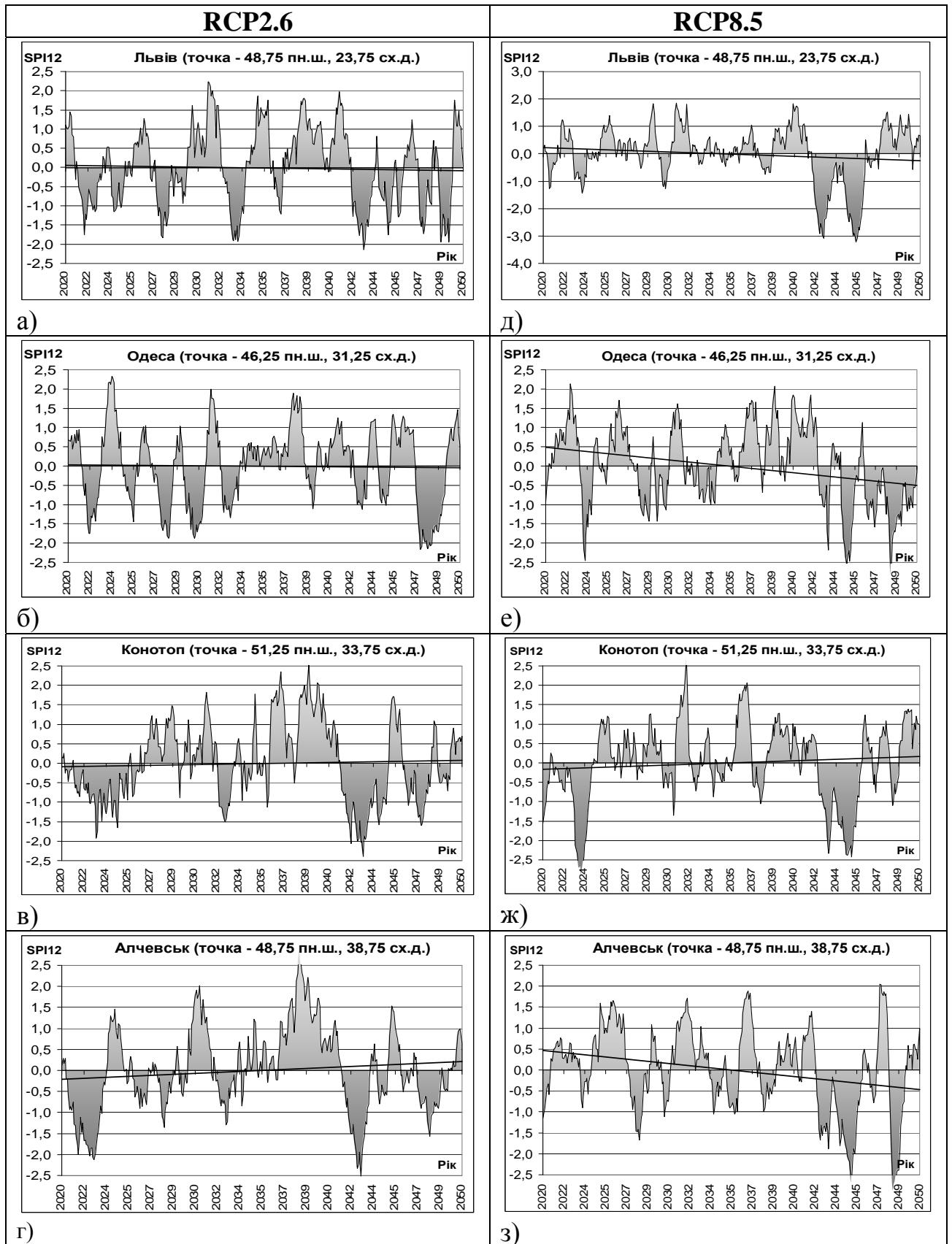


Рис. 3.12. Часовий хід індексу SPI12, розрахованого за даними кліматичних сценаріїв RCP2.6 та RCP8.5, по окремих пунктах України за період 2020-2050 рр. (суцільна пряма – лінія тренду)

Після вологого періоду з 2034 по 2039 рр. спостерігатимуться ще 4 епізоди посух, три з яких будуть слабкими й нетривалими, а остання посуха з 2047 по 2049 рр. досягне екстремальних критеріїв.

За сценарієм RCP8.5 протягом 2021-2042 рр. переважатимуть вологі періоди, а епізодів значних посух очікується лише три (рис. 3.12, е). Найбільш інтенсивна посуха спостерігатиметься у 2024 р. і досягне екстремальних критеріїв, в період з 2028 по 2030 рр. посуха буде від слабкої до помірної, а у 2033-2034 рр. не перевищить слабкої інтенсивності. Останні шість років досліджуваного періоду (2045-2050 рр.) очікуються дуже посушливими – майже безперервна посуха досягатиме екстремальних критеріїв принаймні тричі.

На північному сході країни (Конотоп) в рамках сценарію RCP2.6 за досліджуваний період очікується чотири основних посушливих епізоди (рис. 3.12, в). Тривала посуха з інтенсивністю від слабкої до сильної спостерігатиметься з 2020 по 2026 рр. Другий епізод помірної посухи прогнозується протягом 2032-2033 рр. Найбільш інтенсивна й безперервна посуха очікується у 2042-2044 рр., коли значення SPI12 досягатимуть екстремальних критеріїв. В останній період з 2046 по 2048 рр. посуха буде переважно поміною. Часовий розподіл посух за жорстким сценарієм RCP8.5 подібний до м'якого сценарію, при цьому виділяються два основних періоди – 2020-2024 та 2042-2045 рр., в яких посуха майже безперервна та досягатиме екстремальних критеріїв (рис. 3.12, ж).

На сході (Алчевськ) за сценарієм RCP2.6 прогнозується п'ять основних періодів з посухою (рис. 3.12, г). Часовий проміжок з 2020 по 2036 рр. передбачається більш посушливим, ніж останній період до 2050 рр. Найбільш інтенсивні та тривалі епізоди посух спостерігатимуться у 2020-2024 та 2041-2043 рр., коли посуха досягатиме екстремальних критеріїв. У 2025-2029, 2032-2034 та 2046-2049 рр. посухи будуть від слабких до помірних чергуватимуться з більш вологими періодами. За жорстким сценарієм RCP8.5, навпаки, період до 2035 року буде більш сухим, ніж наступний до 2050 р.

(рис. 3.12, з). З 2020 по 2035 рр. декілька нетривалих періодів переважно з м'якою посухою чергуватимуться з більш інтенсивними вологими періодами, найбільш значущим буде епізод 2027-2029 рр., коли посуха досягне критерію помірної. З 2042 по 2049 рр. інтенсивність і тривалість посух зросте – спостерігатимуться принаймні три посушливих періоди, в двох з яких інтенсивність посух перевищить екстремальні критерії.

Таким чином, за результатами окремих пунктів, за м'яким сценарієм RCP2.6 в різних частинах країни не спостерігатиметься значного коливання частоти посушливих епізодів протягом 2020-2050 рр. Періоди посух будуть чергуватися з вологими періодами порівняної інтенсивності, при цьому найбільш вологим є період з 2034 по 2040 рр., а найбільш важливі епізоди посух спостерігатимуться в 2020-х та 2040-х роках. За жорстким сценарієм RCP8.5 в усіх пунктах, окрім північного сходу, очікується збільшення інтенсивності та тривалості посушливих періодів після 2035 року. При цьому найбільш жорстока посуха, яка досягатиме екстремальної інтенсивності, спостерігатиметься в 2042-2045 рр., а на півдні триватиме до 2050 р.

### Висновки до розділу 3

Глобальне кліматичне моделювання в рамках ППСМ5 згідно чотирьох варіантів репрезентативних траєкторій концентрацій показує, що в більшості широтних зон Північної півкулі, в тому числі на Європейському континенті, протягом ХХІ століття очікується поступове підвищення температури повітря, яке відбуватиметься досить повільно до 2050 року та більш швидкими темпами до 2100 року. Режим опадів, з одночасним збільшенням їх об'єму через зростання температури повітря, буде змінюватися різноманітно в різних регіонах, але з великою долею ймовірності в південній частині Європи загальна кількість опадів зменшиться до кінця століття. Головною проблемою кліматичного моделювання наразі є неможливість повного відтворення послаблення тренду підвищення глобальної температури

протягом 1998-2012 рр., що підвищує ступінь невизначеності результатів моделювання.

Виконаний в дослідженні аналіз просторово-часового розподілу посух у короткостроковій майбутній перспективі до 2050 р. за даними кліматичного моделювання ППСМ5 показав, що в умовах очікуваного підвищення температури повітря та збільшення інтенсивності опадів за сценаріями RCP2.6 та RCP8.5 кількість посух в Україні зміниться незначно, але на зміну більш частих наразі весняно-літніх посух прогнозується збільшення літньо-осінніх посух, повторюваність яких може досягнути раз на 2-3 роки. Суттєве наростання інтенсивності та тривалості посушливих умов очікується по всіх регіонах країни після 2035-2040 рр.

## РОЗДІЛ 4

## ЦИРКУЛЯЦІЙНІ УМОВИ ФОРМУВАННЯ ПОСУШЛИВИХ ЯВИЩ

## 4.1. Особливості великомасштабної циркуляції в посушливі періоди

## 4.1.1. Загальні відомості про стан атмосферної циркуляції

Утворення посух в різних регіонах Європи викликано появою таких процесів, які перешкоджають проникненню вологого морського повітря з Атлантичного океану вглиб континенту. Як показують дослідження, основною причиною виникнення посух на Східноєвропейській рівнині є вторгнення повітря з півночі, північного заходу або заходу та утворення в арктичному, сухому повітрі потужного антициклону [2, 3, 11, 29, 82].

Загальна схема розвитку посухи при антициклонічному процесі є такою. Холодне і сухе повітря арктичного антициклону, що переміщується на південь, прогрівається, одночасно підвищується дефіцит вологи. Процес трансформації триває звичайно 3-4 доби, після чого повітря перетворюється на сухе та тепле [11]. Дефіцит вологи починає поповнюватися за рахунок випаровування з ґрунту, тобто посилюється процес висушування ґрунту. Антициклони звичайно переміщуються повільно, що додатково підсилює посуху. В районі домінування антициклонічної циркуляції 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 і, як наслідок, до дефіциту вжитку вологи рослинами.

Тривале стаціонування антициклону з його постійною регенерацією призводить до посилення посухи. На початку посухи температура повітря буває відносно низькою. Але за тривалого бездощів'я нічне вихолоджування зменшується, що обумовлює підсилення транспірації рослин. Настає різкий дисбаланс між посиленою потребою рослин у волозі та її надходженням до

грунту. Після припинення інтенсивного антициклогенезу з послабленням низхідних вертикальних рухів починає утворюватися конвективна хмарність, яка дещо послаблює посуху.

Західні антициклони азорського походження несуть більш вологі та теплі атлантичні повітряні маси, ніж арктичні антициклони Скандинавського походження. Але, завдяки довгому шляху над суходолом Європейського континенту, атлантичні повітряні маси значно прогріваються та віддаляються від стану насичення водяною парою. Це призводить до загострення посушливих явищ в Україні та Поволжі.

Сильні і тривалі посухи у Східній Європі часто обумовлені встановленням меридіонального переносу в атмосфері регіону та формуванням стаціонарних антициклонів над північчю, північним заходом або центральними районами ЄТР, Нижнім Поволжям або Південним Уралом. Декілька рідше стаціонарні антициклони формуються над Карпатами або відділяються як осередки високого тиску в системі азорського антициклону. В тропосфері утворюється потужний гребінь або антициклон, що розташовується безпосередньо над районом посухи або на північний захід від нього.

За даними І.Є. Бучинського [2], посухи над Східноєвропейською рівниною переважають при східній формі циркуляції (E), другою за повторюваністю є західна форма (W), третьою – меридіональна (C) форма за класифікацією Вангенгейма-Гірса [83]. Загалом, кількість посух при формах E та C, які характеризуються встановленням меридіонального характеру циркуляції над континентом, майже вдвічі більше, ніж при західній формі. На півдні Східної Європи посухи найчастіше розвиваються при високій повторюваності форми циркуляції E у весняно-літній період, а також за умов тривалих періодів з безперервним існуванням цієї форми [2, 84].

Умови для формування посух починають створюватися вже наприкінці зими та навесні. Дослідження показали [85], що в період з лютого по червень над Європою часто утворюються високі, стаціонарні антициклони, які,



перетворюючись на блокуючі, призводять до роздвоєння західного переносу в тропосфері на північну та південну гілки, внаслідок чого на Європейський континент поступає менше вологи. Послаблення західного переносу призводить до розвитку форми Е, при існуванні якої тривалість сонячного сяння може бути аномально великою. В помірних широтах Європи кліматичний мінімум відносної вологості повітря та опадів відзначається в квітні-травні, що також характеризує встановлення антициклонічного характеру циркуляції навесні. У другій половині літа часто західний переніс поновлюється, що є початком припинення бездощового та спекотного періоду на континенті.

Тропосферні антициклони, як вихрові елементи загальної циркуляції атмосфери, мають тенденцію виникати в одних і тих же районах Північної півкулі - у західного узбережжя континентів Європи та Північної Америки, незалежно від сезону року [86]. Починаючи з рівня 850 гПа, проявляються декілька стійких зон підвищених значень геопотенціальних висот, які формують пояс антициклонів навколо Євразії, Північної Америки і Північної Атлантики. Така кільцева зона рідко проявляється повністю, але супроводжується розвитком потужних циклонічних вихорів у середній тропосфері над Канадським архіпелагом, Арктичним басейном і Таймиром. При виникненні високих антициклонів їх східною периферією з полярних широт у південні проникають сухі повітряні маси, сприяючи виникненню посушливих періодів.

Дослідження особливостей великомасштабної циркуляції атмосфери при утворенні посух в Україні [84] показали неоднозначний зв'язок з формами та індексами класифікацій макропроцесів за Вангегеймом-Гірсом та А.Л. Кацем [87]. Ці класифікації спрямовані на визначення форм макропроцесів у межах дуже великих регіонів – природно-синоптичних районах, в яких територія України займає невелику частину та розташована на їх південній периферії. Тому зв'язок між формами макроциркуляції і аномаліями температури та опадів на території України є досить слабкий,

адже на загальному циркуляційному фоні над Україною може виникати локальний процес, який істотно впливає на температурно-вологісний режим окремого регіону (наприклад, вихід південного циклону при загальному антициклогенезі над Європою при формі W). Обчислення індексів циркуляції за А.Л. Кацем також не дає значних відмінностей для посушливих та вологих років в Україні, адже зональний та меридіональний індекси розраховуються для великих районів. Дефіцит опадів при різних формах циркуляції за А.Л. Кацем для відносно малої території України також не є вираженим.

Дослідження повторюваності циклонів та антициклонів у посушливі та вологі роки показало [84], що при утворенні посух в Україні переважала антициклонічна діяльність (53%). В вологі роки, навпаки переважали циклони, але з більшою повторюваністю – 69%. При цьому перевищення тривалості існування антициклонів досягає 14 днів від норми, але посухи спостерігаються й у роки, коли днів з антициклонічною циркуляцією менше за норму.

Для півдня України особливе значення мають південні циклони, адже вони дають до 40-45% (іноді 60-70%) річної кількості опадів переважно в холодний період року [1]. В тепле півріччя основну кількість опадів забезпечують активні атмосферні фронти та процеси відсіченого циклогенезу [88-90], мала повторюваність або відсутність яких призводить до швидкого виникнення дефіциту вологи на фоні високих температур повітря. Аналіз повторюваності південних циклонів в вологі та посушливі роки показав, що суттєвої відмінності у кількості цих процесів немає, але в посушливі роки, особливо влітку, на Україну виходять переважно слабо розвинуті циклони, які дають невелику кількість опадів порівняно з циклонами, які формуються у вологі роки. Тим не менш, роль південних циклонів у режимі зволоженості України дуже велика. Як зазначалося в дослідженнях Кудряня О.П., в роки, коли повторюваність південних циклонів була взимку високою, ймовірність посухи влітку становить всього 3% [91-92].

Аналіз динаміки посух на Україні в період з 1921 по 1975 рр. у зв'язку з річним ходом повторюваності форм циркуляції за Вангенгеймом-Гірсом показав [84], якщо в січні та лютому форма W має зменшену повторюваність, то знак цієї аномалії зберігається протягом наступних 3-4 місяців та у 76% випадків на Україні спостерігається посуха. Але виявилось, що для південних районів України цей зв'язок є слабким. Якщо пов'язувати характер макроциркуляційних процесів з урожайністю сільгоспкультур, то, наприклад, для ярої пшениці, існує слабкий статистичний зв'язок між повторюваністю висотного гребеня над Східною Європою при формі циркуляції E [85], а саме, в Донецько-Дніпровському регіоні коефіцієнт кореляції не перевищує -0,14.

Глобальні зміни клімату, які почалися наприкінці минулого століття, позначилися на характері макроциркуляційних процесів і режимі метеорологічних величин над Східною Європою. Як показали дослідження [93], в Україні відбулося підвищення зимової температури повітря, що призвело до зменшення висоти та періоду залягання снігового покриву. Разом з цим, літо стало дещо прохолоднішим, але збільшилася частота появи відносно коротких сухих періодів з температурою повітря до +35 °С, що вже на п'ятий день викликає суттєве висушування верхнього шару ґрунту. Аналіз баричних полів виявив, що повторюваність описаних раніше атмосферних процесів, які призводять до посух в Україні, зменшилася. Отримано три типи еталонних полів тиску, за яких наприкінці ХХ століття здійснювалося надходження сухого та теплого повітря на південь Східної Європи [94].

Перший тип – західний, який супроводжується надходженням теплого повітря в системі антициклонів, пов'язаних з азорським максимумом. На відміну від попереднього часового періоду, цей процес став менш повторюваним і нестійким за часом, а посушливі умови, як правило, не сильними.

Другий тип – південний, який супроводжується надходженням теплого повітря з півдня, що відбувається на фоні меридіональної перебудови поля тиску в тропосфері. Цей процес не є тривалим, але призводить до суттєвого

підвищення температури повітря (до 10°C за добу) і передує подальшому процесу вторгнення сухого та прохолодного повітря з півночі, який, в свою чергу, є більш тривалим і провокує настання посухи. Цей процес є найбільш несприятливим для сільського господарства саме в весняно-літній період.

Третій тип – східний, пов'язаний з розвитком та розповсюдженням на захід потужного блокуючого антициклону над Уралом. Такий процес може здійснюватися як взимку, забезпечуючи проникнення континентального холодного повітря в Східну Європу, так і в літній період, обумовлюючи, навпаки, надходження прогрітого та сухого континентального повітря в Україну південною периферією високого й теплого антициклону. Процес відбувається на фоні гостро вираженої меридіональності в тропосфері і є дуже стійким завдяки постійній регенерації антициклону [94]. Як показано Цубербіллер Е.А. [8], такі антициклони можуть породжувати в Україні в весняно-літній період ще одне несприятливе посушливе явище – суховій, який виникає за східних та південно-східних вітрах на південній (південно-західній) периферії антициклону, що посилюється над центром або сходом ЄТР. Кажучи про суховії, слід відмітити, що в степових областях України ці явища можуть розвиватися також у відрозі азорського антициклону та у гребенях арктичного походження з півночі, а в літній період короточасні суховії можуть пов'язуватися з термічною депресією або теплим сектором циклону [2].

#### 4.1.2. Циклічні коливання атмосфери і динаміка посух та урожайності

Циклічні коливання атмосферної циркуляції та пов'язаний з ними режим зволоження певних територій є одним з важливих напрямків досліджень, який привертає велику увагу наукового суспільства.

Вивчення динаміки посух показує нерівномірність їх розподілу за часом у фіксованому місці. Часто посушливі роки йдуть один за одним, або, навпаки, розділяються проміжками часу з нормальним зволоженням.

Виявлені певні періодичності в 9-11 років, 20, 30 та 80 років, але вони часто накладаються один на іншого, що не дозволяє побудувати просту схему виникнення та розповсюдження посух [11, 95]. Регіональні коливання поля тиску, на кшталт Північноатлантичної осциляції, значно відбиваються в полі опадів через коливання траєкторій штормових циклонів в Західній Європі, але в східній частині континенту зв'язок не такий очевидний і проявляється в умовах стійких та довготривалих фаз коливання [96, 97].

Періоди коливань атмосферних процесів близько 11 років, звичайно, пов'язують з сонячною активністю, але дослідження зв'язку періодичностей чисел Вольфа з урожайністю зернових не дали будь-яких значущих результатів. Щодо розподілу посух визначено, що екстремальні посухи в Україні спостерігалися як у роки мінімумів, так й у роки максимумів кількості сонячних плям. За дослідженнями Покровської Т.В. [98], за столітній період кількість посух в Україні була майже втричі більше в періоди від максимуму сонячної активності та після нього, ніж в періоди мінімуму кількості сонячних плям. При цьому 87% весняних посух, найбільш небезпечних для сільського господарства, відбувалося, коли річна кількість сонячних плям була вищою за норму. Як зазначає І.Є. Бучинський [2], за деякими відомостями це може пов'язуватися зі збільшенням меридіональних процесів у періоди максимуму сонячної активності.

Більш досліджуваними та підтвердженими є відомості про наявність високочастотних квазидворічних коливань в атмосфері Землі та їх вплив на кліматичний режим окремих територій через коливання регіональних синоптичних процесів. З 60-х років ХХ століття з розвитком наземної спостережної бази та супутникового зондування в тропічних і екваторіальних широтах почалися масштабні дослідження режиму вітру в стратосфері цих регіонів Земної кулі, які виявили наявність міжрічних коливань швидкості та напрямку зонального вітру з квазидворічною періодичністю. В докладних оглядах з проблеми квазидворічних коливань (КДК) зонального вітру в екваторіальній атмосфері показано [99, 100], що метеорологічні

спостереження і чисельні експерименти дають симетричну структуру амплітуди КДК з максимумом в районі екватора. Як можна бачити з рис. 4.1, період коливань КДК не дорівнює строго двом рокам. Роботи по вивченню даних спостережень вітру в стратосфері на ізобаричних поверхнях від 70 до 10 гПа за допомогою вейвлет-аналізу, спектрального аналізу тощо показали, що КДК проявляється у вигляді двох режимів з періодами коливань в 2 та 2,5 роки. Як зазначено у Т.В. Покровської [98], періодичність коливань може змінюватися в межах від 21 до 33 місяців. Зміна режимів західного та східного вітрів на рівні 50 гПа відбувається переважно наприкінці весни або влітку. Амплітуда і період коливань зростає на верхніх рівнях стратосфери. КДК зонального вітру також пов'язані з аналогічними коливаннями температури в стратосфері тропічних широт.

Виявлення КДК як стійкого елемента загальної циркуляції атмосфери (ЗЦА) викликало низку досліджень по встановленню фізичних механізмів зв'язку цього коливання з іншими ланками ЗЦА. Як зазначається в огляді Г.Р. Хайруллиної та ін. [99], в деяких роботах отримані докази впливу КДК зонального вітру на меридіональну циркуляцію атмосфери, яка призводить до змін умов розповсюдження планетарних хвиль в позатропічних широтах. Найбільший відгук таких взаємодій проявляється в зимовий період, при цьому стратосферний полярний вихор при західній фазі КДК більш інтенсивний, ніж при східній, коли зона східних вітрів зсувається в більш високі широти й обмежує меридіональний розподіл планетарних хвиль. Окрім виявленого зв'язку з процесами високих широт, висловлюється припущення про можливу взаємодію КДК з Південним коливанням-Ель Ніньо через вплив на амплітуду тропосферних планетарних хвиль [100].

Деякі дослідження, проведені у минулому столітті, показали, що в часовому ході гідрометеорологічних величин в різних широтних поясах проявляються циклічні коливання з квазідворічною періодичністю.

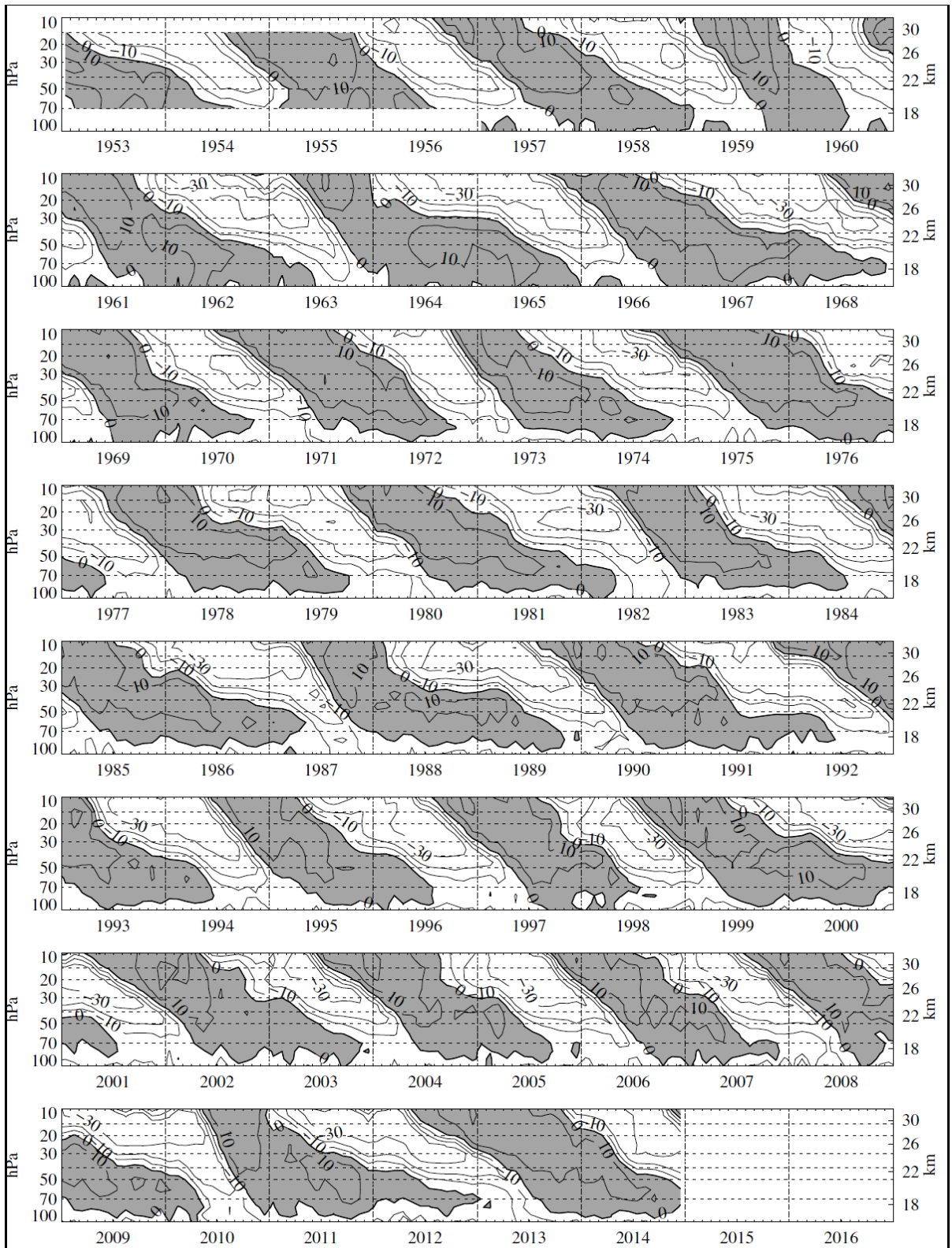


Рис. 4.1. Просторово-часовий розріз стратосферного зонального вітру (рівні 100-10 гПа), побудований за даними екваторіальних станцій: Canton Island (січень 1953 - серпень 1967), Gan/Maledive Islands (вересень 1967 – грудень 1975), Singapore (січень 1976 – грудень 2014). Ізоплети проведені через  $10 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ , зони західних вітрів заштриховані (джерело <http://www.geo.fu-berlin.de>)

В огляді В.М. Пасова [58] вказується, що коливання періодичністю 26-28 місяців знайдені в часових рядах температури повітря, тиску й опадів по станціях Європи та Північної Америки; навіть коливання шляхів переміщення циклонів в Північній Атлантиці мають квазідворічну циклічність.

Оскільки коливання відбуваються в елементах погоди, відповідні коливання слід очікувати й в залежних від них врожаях сільськогосподарських культур. Вперше на наявність дворічних коливань урожайності зернових культур було вказано в роботі П.І. Колоскова [101], який відмітив, якщо врожай попереднього року був вищим за врожай поточного року, то в наступному році врожай буде також вищим за поточний рік. Подальші дослідження В.М. Пасова показали [58, 102], що можна виділити регіони, в яких середньообласні врожаї коливаються в квазідворічному режимі. До таких регіонів на території колишнього Радянського Союзу належать райони Середнього та Нижнього Поволжя, частина Казахстану і Середньої Азії. В той же час в деяких центральних та південних районах ЄТР та в Україні циклічні коливання виражені слабо. Виявлена тривалість циклів становила від 24 до 28 місяців. При цьому така циклічність пов'язується не тільки з коливаннями атмосферних макропроцесів та чергуванням сприятливих та несприятливих за метеорологічними умовами сезонів, але й коливанням родючості ґрунтів, яка при високому врожаї знижується завдяки виносу великої кількості поживних речовин й неможливістю повністю відновитися природнім шляхом до наступного вегетаційного сезону, що призводить до зниження урожайності у наступному році. І хоча при високому рівні агротехніки цим фактором можна знехтувати, В.М. Пасов зазначає, що родючість ґрунтів може підсилювати або знижувати вплив циклічних коливань атмосфери на урожайність.

На формування врожаю сільськогосподарських культур насамперед, впливає кількість опадів. Дослідження на території колишнього СРСР показали, що майже в усіх регіонах спостерігається 2-3 річна циклічність в опадах, а на заході ЄТР, в районах Нижнього Поволжя та західного



Казахстану також відмічені 4-5 річні періодичності [95]. В цих же районах, як зазначалося вище, знайдена відповідна квазидворічна мінливість врожаїв.

За даними об'єктивного аналізу просторово-часового розподілу циклонічних утворень над Східною Європою за період 1953-2011 рр. виявлено, що різниця кількості опадів між різними фазами КДК у досліджуваній період часу обумовлена дещо різною локалізацією траєкторій циклонів [103]. У травні шляхи циклонів локалізуються над Україною вздовж 50° пн.ш. в обох фазах КДК (рис. 4.2). Але у західній фазі повторюваність циклонів збільшується над північною половиною України (рис. 4.2, а), а в східній фазі їх кількість є меншою, а зона максимальної повторюваності зміщена на північний захід країни (рис. 4.2, б). Для червня значущих переваг у повторюваності циклонів у різних фазах КДК не простежується.

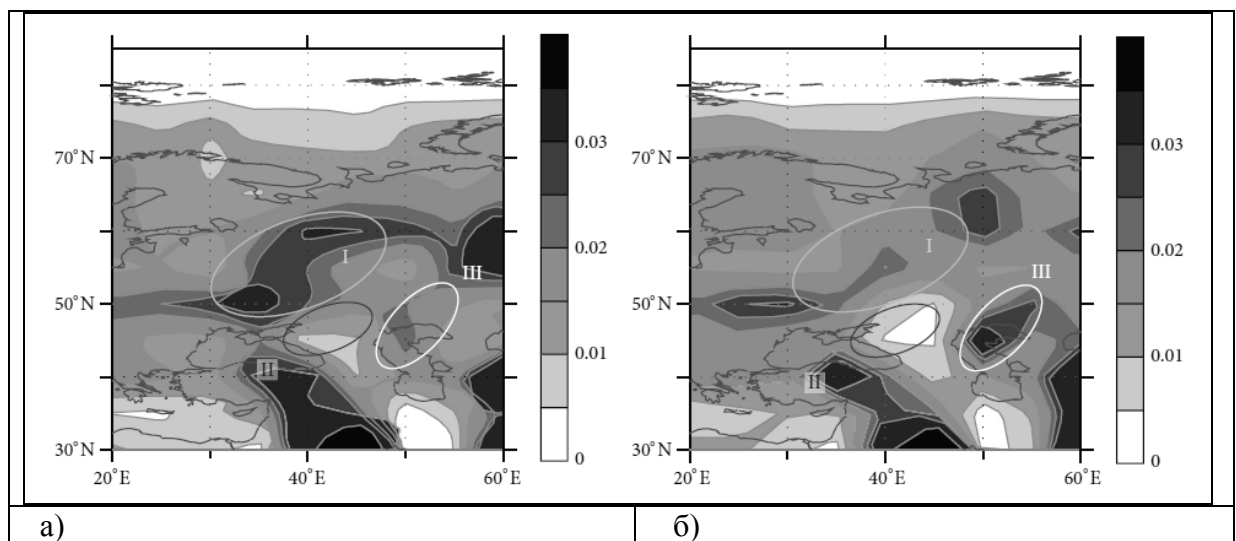


Рис. 4.2. Відносна повторюваність циклонів за період 1953-2011 рр. (у долях кількості циклонічних центрів в осередку сітки 5°x5°) у травні в західній (а) та східній (б) фазах КДК [103]

Оцінка інтенсивності та розповсюдженості посух за індексом SPI в той же період часу показала, що у травні і червні найбільша повторюваність посух спостерігалася на заході та сході України. При цьому по всій території середня кількість сильних посух у східній фазі КДК була вищою, ніж у західній фазі зі значущими різницями у кількості від 9 до 16% в різних

регіонах [103]. У травні таких посух у фазі Е було найбільше в центрі України та Приазов'ї, у червні найбільша кількість сильних посух спостерігалася на сході країни. У західній фазі W сильні посухи у травні також спостерігалися в центральних областях України, а у червні – на півночі.

Формальне порівняння отриманих нами у попередньому розділі даних щодо динаміки посух останнього періоду 1995-2012 рр. з фазами КДК показує, що в роки, коли у вегетаційний сезон посуха наставала не менш ніж у двох агрокліматичних зонах – це 1996, 2000, 2003, 2007, 2009, 2012 роки, спостерігалася східна фаза КДК (див. рис. 4.1).

Покажемо, як співвідносяться коливання урожайності зернових культур на території України та КДК зонального вітру в екваторіальній зоні. Для цього в дослідженні використані дані про зональний вітер ( $u$ ) на рівні 30 гПа в екваторіальній зоні (Freie Universität Berlin, <https://climatedataguide.ucar.edu>) за квітень-червень 1948-2013 рр. для визначення фаз КДК – західної W ( $u > 0$ ) та східної E ( $u < 0$ ). Часовий хід фаз КДК можна бачити на рис. 4.1. Дані по опадах та урожайності, а також індексу посушливості SPI були проаналізовані для двох фаз КДК окремо.

У табл. 4.1 представлені результати порівняльного аналізу сумарної урожайності озимої пшениці та ярого ячменя по основних агрокліматичних зонах та Україні в цілому, у західній та східній фазах КДК. Переважаюча фаза визначалася за знаком зональної складової швидкості вітру  $u$  в середньому за три місяці, з квітня по червень. Всього за 66 років спостерігалосся 33 роки з східною фазою (E) та 33 роки із західною фазою (W). Можна бачити, що як для озимої пшениці, так і для ярого ячменя спостерігається перевищення середньої урожайності у західну фазу над урожайністю у східну фазу КДК. Найбільше перевищення відмічається в Степовій зоні – понад 22% для обох культур. Далі на північ перевищення зменшується до 14% для озимої пшениці та 10% для ярого ячменя. Загалом по Україні середнє перевищення урожайності у західну фазу становить 19,7 і 15,7% відповідно для озимої пшениці та ярого ячменя.

Таблиця 4.1

Параметри урожайності озимої пшениці і ярого ячменя по агрокліматичним зонам України у двох фазах КДК за період 1948-2013 рр.

Параметр, ц/га	Озима пшениця				Ярий ячмінь			
	Степ	Лісо- степ	Поліс- ся	Украї- на	Степ	Лісо- степ	Поліс- ся	Украї- на
<i>Середня урожайність</i>	24,0	27,1	23,4	25,1	18,4	22,4	21,6	20,6
Фаза Е	21,64	24,63	21,81	22,83	16,47	21,01	20,58	19,12
Фаза W	26,40	29,57	24,91	27,32	20,24	23,85	22,65	22,11
W / E (%)	22,03	20,03	14,20	19,70	22,91	13,50	10,10	15,67
<i>Стандартне відхилення</i>								
Фаза Е	8,14	9,90	8,31	8,47	6,45	7,90	7,99	7,07
Фаза W	6,41	8,60	7,87	7,23	4,83	6,44	6,75	5,53
<i>Медіана відхилення</i>								
Фаза Е	-0,48	-3,75	0,23	-1,07	-2,35	-2,33	-2,52	-0,55
Фаза W	3,09	2,51	3,57	2,44	2,05	1,87	2,57	3,07

Міжрічне коливання урожайності зернових культур є більшим у східній фазі, на що вказують значення стандартного відхилення ( $\delta$ ). Якщо в середньому по Україні для східної фази  $\delta$  перевищує 8 ц/га для озимої пшениці та 7 ц/га для ярого ячменя, то для західної фази ці показники менші майже на 1,5 ц/га, що свідчить про переважання більш сприятливих погодних умов і меншій їх мінливості у фазі W.

Медіанні значення для відхилень від середнього по кожній фазі окремо показують, що у фазі W спостерігаються додатні відхилення урожайності від середнього значення для обох зернових культур, тоді як у фазі Е медіана має від'ємний знак майже в усіх агрокліматичних зонах – переважають недобори врожаю.

Одержані результати яскраво свідчать про вплив квазідворічного коливання на урожайність, який, вочевидь, здійснюється через циклічні зміни у режимах регіональної циркуляції атмосфери і метеорологічних величин. Дійсно, як показано в [103], в період 1953-2011 рр. в роки західної фази КДК на території України спостерігалися більш сприятливі умови зволоження, ніж в роки східної фази. У західну фазу осереднені суми опадів у травні-червні

перевищували суми опадів при східній фазі. Найбільш суттєві різниці між опадами у різні фази спостерігалися у травні в центральних областях України – від 27 до 59%. Крім того, у подібному дослідженні коливань урожайності озимої пшениці по окремих областях України за період 1953-1990 рр. зазначено [31], що найбільше підвищення урожайності у західну фазу спостерігалось у Дніпропетровській (11,6%), Кіровоградській (12,4%), Полтавській (14,3%), Харківській (17,2%) та Луганській (24,9%) областях.

Виявлені залежності між урожайністю зернових культур в Україні та КДК екваторіального вітру є перспективними для подальшого їх дослідження і пошуку кількісних зв'язків, які можуть поліпшити існуючі статистичні моделі прогнозування урожайності.

## 4.2. Зв'язок посух в Україні з блокуючими процесами в атмосфері

### 4.2.1. Поняття та визначення атмосферного блокування

Численні дослідження в області вивчення циркуляційних особливостей атмосфери під час тривалих та інтенсивних посух, що виконувалися різними авторами синоптичними та кількісними методами, дозволили скласти певну картину, яка відображує структуру тропосферного поля тиску і потоків повітря, та може бути описана за допомогою синоптичних критеріїв блокування або індексів блокування [104-105].

Синоптичні методи ґрунтуються на аналізі взаємного розташування зони конвергенції потоку і осередків ізалогіпс на картах АТ-500 і ВТ-500/1000 та врахуванні 3-4-місячної циклічності реперних процесів антициклогенезу. За результатами досліджень блокуючих процесів виділено три основних типи синоптичних процесів при блокуванні, залежно від конфігурації висотного гребеня і траєкторії приземного антициклону [104]. У будь-якому випадку, типовою ознакою блокування є розщеплення зонального потоку на дві гілки, які огинають „блок” по південній та північній периферії, а

потім обидві гілки знов зливаються до одного потоку. Перша форма блокуючих процесів характеризується розщеплюванням західного потоку на дві гілки, які обтікають структуру висотного баричного поля у вигляді „диполя” (на півночі – антициклон, на півдні – циклон). У поверхні землі розташовується антициклон, що повільно зміщується в процесі блокування за петле-подібною траєкторією. Друга форма блокування характеризується наявністю висотного, меридіонально орієнтованого гребеня. У поверхні землі синоптичні процеси мають чітко виражену меридіональність. Формування і тривале існування такого гребеня часто пов’язане з субтропічним максимумом, наприклад, з азорським антициклоном для процесів блокування над Європою. Третя форма блокування характеризується омега-подібною формою висотного гребеня, якій має більшу протяжність у зональному напрямі, ніж у попередньому випадку. У поверхні землі антициклони повільно переміщуються в східному напрямі. Характерною особливістю блокуючих антициклонів всіх типів є їх безперервна регенерація, яка обумовлена надходженням холодних мас повітря, як правило, в тилу циклонів, що зміщуються по східній периферії висотного гребеня. При цьому може відбуватися формування нових теплих осередків високого тиску на західній периферії блокуючої системи.

Окрім структури висотного термобаричного поля, у синоптичній практиці для визначення процесу блокування враховують історичну послідовність процесу, тривалість існування, яка за різними джерелами повинна становити не менше 3-10 діб, велику просторову протяжність і географічне розташування блоку в помірних та високих широтах.

Особливо інтенсивні та тривалі 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 у ті ж роки. Але аналіз кожної конкретної посухи показує, що атмосферне блокування є необхідною, але не завжди достатньою умовою утворення

посухи [106]. Так, посуха 1972 р. супроводжувалася блокуванням з розщепленням атмосферного потоку протягом тривалого проміжку часу в теплий період року, що призвело до формування дефіциту опадів на ЄТР. В той же час цій посусі, а також масштабним посухам 1963, 1975, 1981 рр. передували аномальні зими: грудень та лютий – теплі (на 2-4 °С вище за норму), січень – аномально холодний (на 10 °С нижче за норму), що призвело до різкого зменшення висоти снігового покриву та збільшення дефіциту вологи у весняно-літній період. Крім того, дефіцит опадів може бути пов'язаний з антициклонічною циркуляцією, яка не супроводжується блокуванням, як буде показано далі.

З кінця 1970-х років минулого століття основна увага у дослідженні блокуючих процесів стала приділятися пошуку об'єктивних методів виявлення блоків [105]. Найбільш уживаними показниками (або індексами) блокування стали такі, що відображують існування малорухомого, високого антициклону чи гребеня, або дипольну структуру поля геопотенціалу. На сучасному етапі розвитку метеорології немає ні загальноприйнятого визначення процесу блокування, ні чисельного критерію, що його визначає. Лейєнас і Окленд [107] застосували різницю геопотенціальних висот ( $H$ ) між широтами 40 та 60° пн.ш. на рівні АТ-500 гПа для створення довготного індексу блокування  $I(\lambda)$

$$I(\lambda) = H_{40^\circ \text{ пн.ш.}}(\lambda) - H_{60^\circ \text{ пн.ш.}}(\lambda). \quad (4.1)$$

Довгота  $\lambda$  визначається як блокуюча, якщо одночасно задовольняються умови:

$$\begin{aligned} I(\lambda) &< 0; \\ (I(\lambda-10) + I(\lambda) + I(\lambda+10)) / 3 &< 0. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Тібальді і Монтені [108] в своїх дослідженнях відзначили, що індекс Лейєнаса-Окланда може бути від'ємним за наявності відсічених висотних

циклонів, що переміщуються до полюсу, але в дійсності процес не відповідає блокуванню. Для виключення такої ситуації було запропоновано розраховувати додатковий параметр, який вкупі з вже існуючим утворив індекс блокування Тибальді-Монтені. Згідно цій методиці, визначаються два типи градієнтів геопотенціальної висоти поверхні АТ-500 гПа - *GHGN* та *GHGS*, які розраховуються для кожної довготи. Градієнт *GHGS* пропорційний до компоненти зонального геострофічного вітру та є виміром інтенсивності зональної течії для кожної довготи, аналогічно індексу  $I(\lambda)$ . Градієнт *GHGN* уведений для того, щоб виключити неблоковані течії за наявності відсічених мінімумів північніше  $60^\circ$  пн.ш. Індекс Тибальді-Монтені виявився досить зручним для автоматизації процесу розрахунку за даними об'єктивного аналізу, що сприяло його популяризації в дослідженнях блокування атмосфери [105, 109].

Блокуючі процеси проявляються в атмосфері не тільки з певною періодичністю, але й зосереджені у локалізованих географічних регіонах [104]. В одному з останніх фундаментальних досліджень по кліматології блокування в Північній півкулі, виконаному Барріопедро та ін. [109], показано наявність двох основних секторів блокування в холодному сезоні – Євроатлантичний (з максимумом на  $10^\circ$  сх.д.) та Тихоокеанський (з максимумом на  $180^\circ$  сх.д.). Блоки концентруються в широтній смузі  $60-70^\circ$  пн.ш., але в Євроатлантичному регіоні є тенденція до зміщення положення блокувань південніше за  $60^\circ$  пн.ш., а в Тихоокеанському секторі – північніше цієї широти. В теплом сезоні Тихоокеанський максимум роздвоюється на дві смуги – близько  $120^\circ$  сх.д. та  $150^\circ$  зх.д. Аналогічна ситуація фіксується в Євроатлантичному регіоні – два райони локалізуються близько  $10^\circ$  зх.д. та  $30^\circ$  сх.д. Звертає на себе увагу той факт, що з цих знайдених зон блокування три розташовані на межі океан-континент і лише одна всередині континенту на межі Європи та Азії. В холодний період року максимальна повторюваність блокування зосереджена над океанічними поверхнями, в теплий сезон спостерігається зміщення цих осередків в

напрямку до полюсу та на межу океан-континент. Порівняння результатів авторами цього дослідження з попередніми показало, що хоча, в цілому, влітку спостерігається зменшення кількості процесів блокування, частота блокування суттєво зросла над сходом Європи та заходом Азії, що дозволяє говорити про появу третього центру блокування в Північній півкулі. На часту повторюваність антициклонічних центрів над Східною Європою та Україною, зокрема, вказано в дослідженні Мартазинової В.Ф. та ін. [49, 93], де в кліматичних приземних полях тиску знайдено пересування на схід протягом ХХ століття основних антициклонічних центрів дії атмосфери, внаслідок чого над даним регіоном в еталонних полях простежується антициклон або розвинутий гребінь в усі сезони року.

Наприкінці ХХ - початку ХХІ століття на території Європи, як показано в [110-111], максимум блокуючих ситуацій спостерігався над районами Прибалтики, а також Уралом. Середня тривалість блокування при цьому склала 6–7 діб, а найбільша кількість блокуючих ситуацій при найдовшій тривалості відмічалася влітку. Найбільшою кількістю блоків за розглянутий період (1998-2008 рр.) були відмічені 2003 та 2006 рр., хоча в наступному 2010 рік став одним з найвидатніших за тривалістю та інтенсивністю блокуючих процесів в поточному столітті [29, 61]. Посуха влітку 2010 р. на Європейській території Росії була аналогічною тій, що охопила ті ж регіони у 1972 р. Порівняльний аналіз циркуляційних умов в 2010 та 1972 роках показав наявність спільних рис, пов'язаних з блокуючими процесами [112]. В обох випадках в Північній півкулі тривалість блокуючих процесів була більша за середню, в теплий сезон переважали вторгнення арктичного сухого повітря, яке, прогріваючись, підтримувало існування антициклонічних утворень у поверхні землі тривалий час. Більш того, в сучасний період (1998-2013 рр.), як показано в [113], спостерігається загальне підвищення тривалості та одночасного формування блокуючих процесів – 3-4 на півкулі порівняно з 2-3 процесами у 1960-ті роки минулого століття. Оскільки блокування супроводжується посиленням міжширотного обміну повітряними масами,



збільшення сумарної кількості та тривалості блокуючих процесів може бути одним з факторів сучасної стабілізації тренду глобальної температури.

#### 4.2.2. Просторова структура блокування при посухах в Україні

Відомо, що на півдні Східної Європи посухи найчастіше розвиваються за високої повторюваності східної форми циркуляції (E) у весняно-літній сезон [85, 114-115]. Напередодні посушливого періоду, як правило, значну повторюваність мають високі і розвинуті за площею антициклони, які стаціонують в різних частинах Європи і призводять до зміни зонального перенесення в атмосфері на меридіональний, внаслідок чого основні шляхи циклонів та їх зон опадів пролягають північніше або південніше континентальної Європи. Антициклонічний характер циркуляції в помірних широтах, в цілому, є характерним для квітня та травня, що визначає високу повторюваність і тривалість бездошових періодів, які впливають на встановлення річного мінімуму відносної вологості повітря та опадів. Звичайно, ці показники можуть посилюватися завдяки утворенню стаціонарних або блокуючих антициклонів.

Для оцінки просторово-часової структури блокування атмосфери під час посух в Україні були використані дані каталогу весняно-літніх посух [6], починаючи з 1948 по 1986 роки. Всього розглянуто 16 років, коли спостерігалися сильні посухи з розповсюдженням на понад 30% від площі території України протягом квітня-червня. В табл. 4.2 наведені основні відомості про посухи, а саме – площа охоплення посухою у відсотках від площі України, області, в яких спостерігались найнижчі значення ГТК. В таблиці також представлені дані по визначених центрах блокувань, які будуть розглядатися нижче. Можна бачити, що в кожному десятилітті спостерігалось щонайменше три-чотири роки з весняно-літніми посухами. Особливо посушливим видався період 1950-1960-тих років минулого століття.

## Характеристика весняно-літніх посух в Україні за період 1948-1986 рр.

Рік	Площа охоплення посухою, % [6]	Центр посухи, області України [6]	Найменші значення ГТК [6]	Центри блокування (градуси сх.д.)		
				квітень	травень	червень
1948	40	Херсонська, Дніпропетровська	0,5-0,6	30,0-32,5 10,0-12,0	35,0-42,5	37,5-42,5 62,5-67,5
1950	75	Дніпропетровська, Донецька	0,4-0,5	52,5-65,0	17,5-22,5	22,5-27,5 47,5-70,0
1951	50	Дніпропетровська, Одеська, Миколаївська	0,5-0,6	62,5-67,5	10,0-12,5	37,5-40,0 67,5-70,0
1954	52	Херсонська, Крим	0,4-0,5	10,0-20,0	10,0-27,5	35,0-42,5
1957	57	Херсонська, південь Криму	0,2-0,3	30,0-32,5	32,5-37,5	37,5-40,0 47,5-50,0
1959	62	Запорізька, Харківська, Луганська, Полтавська	0,5-0,6	10,0; 37,5	32,5-37,5	42,5-45,0
1963	57	Донецька, Запорізька	0,6-0,7	37,5-40,0	35,0-37,5	10,0-15,0 70,0-75,0
1964	51	Південь Житомирської, Херсонська	0,6-0,7	27,5-30,0	27,5-30,0 72,5-80,0	32,5-35,0 57,5-60,0
1967	37	Одеська, Миколаївська	0,6-0,7	50,0-52,5	32,5-35,0	27,5-32,5
1968	67	Запорізька, Херсонська, Дніпропетровська	0,2-0,3	22,5-27,5 62,5-65,0	37,5-40,0 10,0-12,5	10,0-15,0 37,5-40,0
1972	54	Запорізька, Луганська	0,5-0,6	10,0; 25,0	10,0-12,5	32,5-35,0 65,0-70,0
1975	52	Луганська, Донецька	0,4-0,5	35,0-37,5	32,5-35,0	20,0-25,0
1979	62	Луганська, Донецька, Херсонська, Запорізька	0,4-0,5	12,5-20,0 50,0-55,0	27,5-32,5	20,0-25,0
1981	41	Схід Дніпропетровської	0,5-0,6	10,0-12,0	32,5-35,0	62,5-65,0
1983	49	Кіровоградська, Одеська	0,4-0,5	45,0-50,0	32,5-35,0	77,5-80,0 30,0-32,5
1986	39	Кіровоградська, Запорізька	0,3-0,4	32,5; 52,5-55,0	27,5-32,5	20,0-22,5

У 1968 р. відмічена найсильніша посуха за площею охоплення та значеннями ГТК. Інтенсивні посухи також спостерігалися у 1950, 1959, 1972 роках. В 11 роках площа охоплення посухою перевищила 50% території країни. Якщо розглядати центри посух, то найбільш часто такими виявляються степові області України – Одеська, Херсонська, Миколаївська, Запорізька, Донецька та Луганська. Доволі часто сильні посухи виникали у Дніпропетровській та Кіровоградській областях і Криму. Інші області України в меншому ступені схильні до прояву сильної посухи.

Для аналізу блокуючих ситуацій над територією України використовувалась запропонована Лейєнасом формула [116], яка пристосована для визначення індексів блокування у вузлах сітки

$$I(\lambda, \varphi) = H(\lambda, \varphi - 15) - H(\lambda, \varphi), \quad (4.3)$$

де  $H$  – значення геопотенціальної висоти  $H_{500}$ ;

$\varphi, \lambda$  – відповідно, широта та довгота вузла розрахунку.

Вузол сітки відноситься до блокуючого, якщо  $I(\lambda, \varphi) < 0$ . При цьому необхідно враховувати додатковий критерій, за якого західна складова геострофічного вітру у напрямку до полюсу від широти  $\varphi$  на довготі  $\lambda$  повинна бути  $\geq 15 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$ .

Для розрахунку індексів блокування в дослідженні використані дані реаналізу Національного центру передбачення клімату США NCEP-NCAR: поля геопотенціальної висоти на рівні 500 гПа, взяті по області, окресленої координатами 10–80° сх.д. і 25–70° пн.ш. за весняно-літній сезон (квітень-червень) в роки з сильними посухами, зазначеними в табл. 4.2.

Спираючись на той факт, що синоптичний період блокування звичайно перевищує 3 доби, а до сильних посух призводять тільки тривалі ситуації, які не сприяють утворенню опадів, для аналізу взяті осереднені за пентадами поля геопотенціальної висоти. Отже, приймемо апріорі, якщо процес блокування стійкий та інтенсивний, він проявиться в будь-якій формі

блокування в осередненому висотному баричному полі. Вважаємо, що це припущення також може дозволити використовувати формулу (4.3) без додаткової умови по швидкості вітру, адже при існуванні стаціонарної довгої хвилі меридіональний градієнт тиску (та, відповідно, швидкість вітру) найбільший на вершині висотного гребеня [117]. Слід також зазначити, що індекс Лейєнаса-Окланда пристосований для визначення блокуючих структур по типу „диполя”, та в деякій мірі може враховувати омега-подібний гребінь (поява двох квазісиметричних осередків від’ємних значень індексу), але не виявляє розвинутих меридіональних гребенів. В кожному з 16 випадків посух індекси блокування були розраховані щопентадно, отримані середньомісячні поля, аналіз яких дав змогу визначити картину районів блокування при посухах [118].

У квітні (рис. 4.3) найбільша кількість блокуючих ситуацій виявляється в широтній смузі  $45,0-65,0^{\circ}$  пн.ш. з максимумом вздовж  $52,5-55,0^{\circ}$  пн.ш. При цьому, район найбільшої частоти появи блокуючих ситуацій (понад 12%) локалізований між  $25,0$  та  $62,5^{\circ}$  сх.д., тобто охоплює майже повністю територію України. На схід від  $70^{\circ}$  сх.д. блокуючих ситуацій не спостерігалось взагалі, а на захід від  $25^{\circ}$  сх.д. за невисокої повторюваності блокуючих ситуацій (до 12%) відбувається зміщення їх на північ.

У травні загальна повторюваність блокуючих ситуацій значно зростає, а максимум локалізується над територією України (рис. 4.4). Осередок найбільшої повторюваності (понад 25%) знаходиться в області, окресленій координатами  $50,0-62,5^{\circ}$  пн.ш. та  $22,5-47,5^{\circ}$  сх.д. Як й у квітні, блокуючі ситуації не відмічалися східніше за  $70^{\circ}$  сх.д. Можна бачити, що над Західною Європою формується інший осередок блокування, пов’язаний з інтенсифікацією азорського антициклону.

У червні інтенсивність блокування в регіоні, що розглядається, послаблюється (рис. 4.5). Основний осередок зберігається у тих самих довготних межах, але слід звернути увагу на збільшення блокуючих структур на північ і схід від України, внаслідок чого максимум блокування

спостерігається північніше території країни. Ця ситуація пов'язана із загальною перебудовою тропосферного баричного поля на літній тип, в якому сезонною особливістю є розвиток висотного гребеня над континентом.

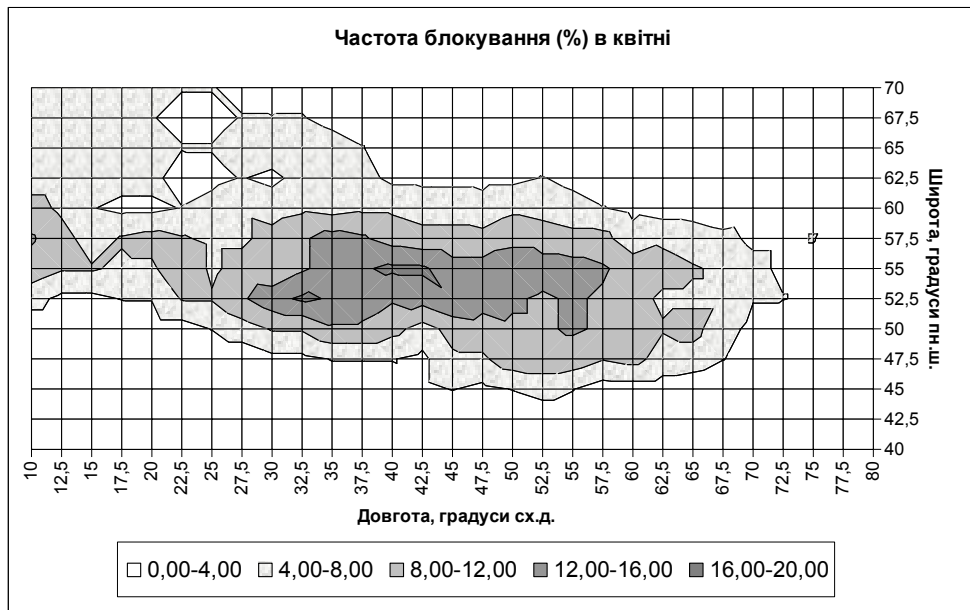


Рис. 4.3. Просторовий розподіл блокуючих ситуацій у квітні

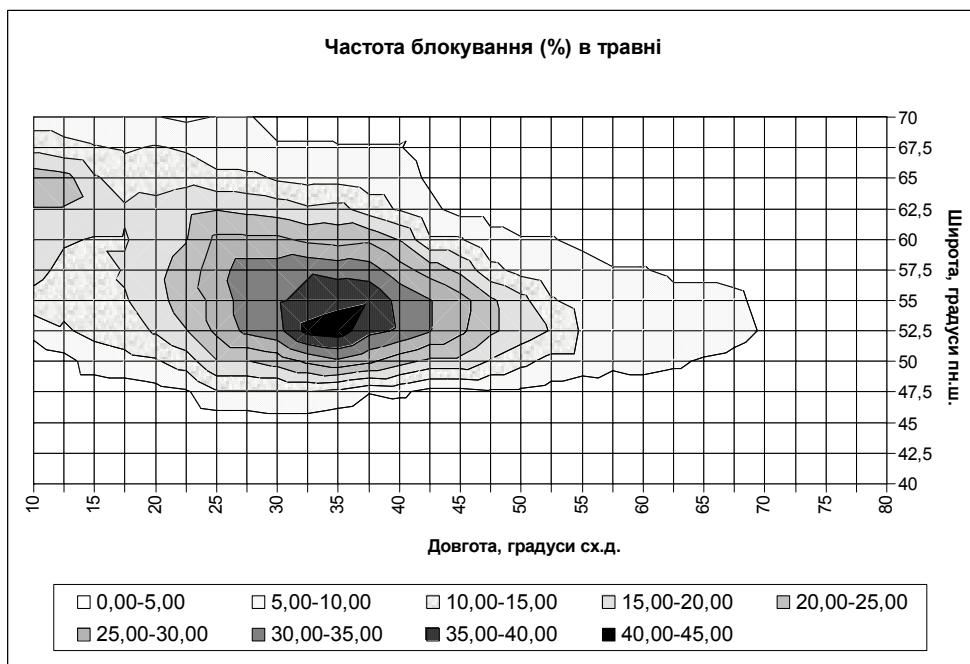


Рис. 4.4. Просторовий розподіл блокуючих ситуацій у травні

Загальна картина розподілу блокуючих ситуацій у весняно-літній сезон має риси місячних структур блокувань та характеризується осередком

максимальної повторюваності (понад 25%) над північними районами України і центральними районами ЄТР (рис. 4.6).

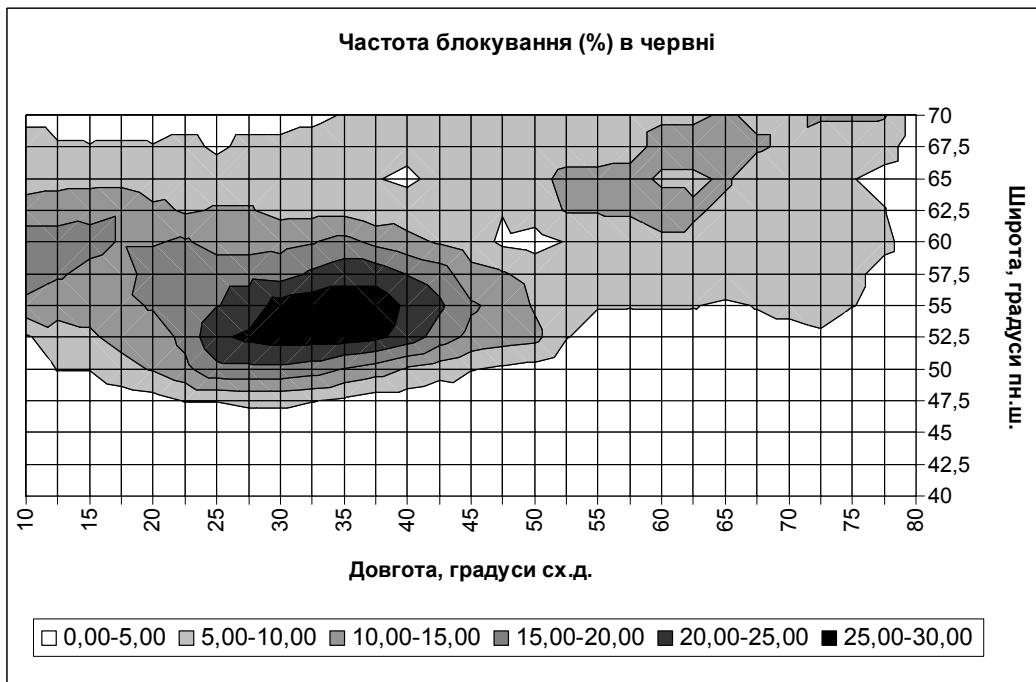


Рис. 4.5. Просторовий розподіл блокуючих ситуацій у червні

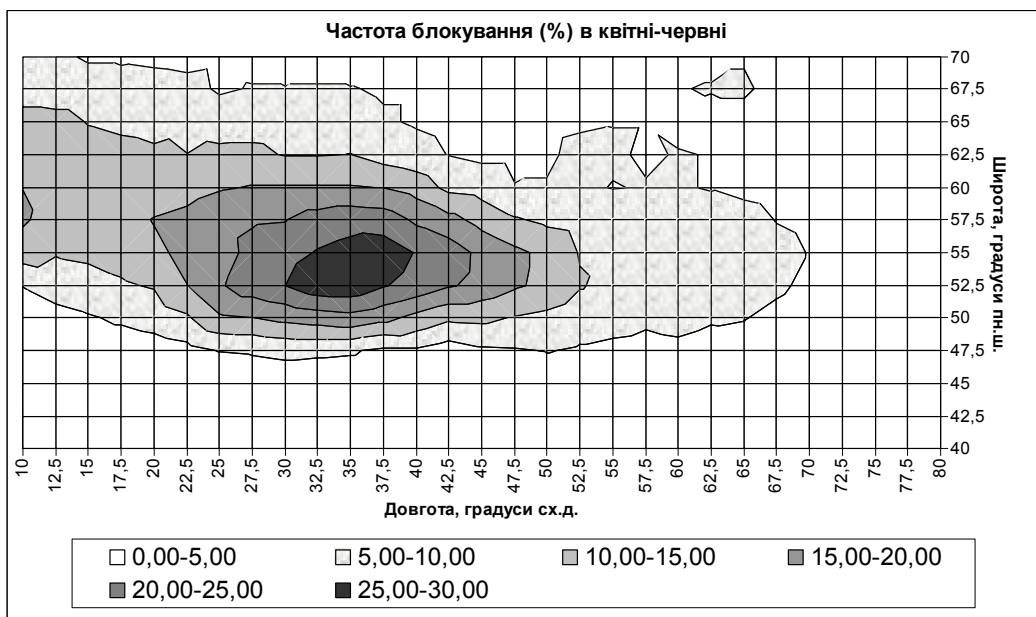


Рис. 4.6. Просторовий розподіл блокуючих ситуацій у квітні-червні

Формування вторинного максимуму на захід від  $10^{\circ}$  сх.д. свідчить про те, що в посушливі сезони режим регіональної циркуляції над Україною обумовлений антициклонічними процесами різного географічного походження, такими, як розвиток та поширення на континент гребеня

азорського антициклону або надходження в Східну Європу антициклонів скандинавського походження. Останні перетворюються на стаціонарні процеси завдяки інтенсивній трансформації арктичного повітря над прогрітим континентом, де формується позитивна аномалія температури повітря, яка підтримує висотний гребінь в значній товщі тропосфери. Одночасне сезонне послаблення зональної циркуляції в Атлантико-Європейському регіоні дає змогу розвиватися меридіональним процесам над континентом, внаслідок чого найбільш частим є стаціонування меридіонального гребеня над Східною Європою. В усі місяці сезону максимальна кількість блокуючих процесів спостерігалася вздовж широти  $55^{\circ}$  пн.ш., яку можна в даному випадку вважати центральною для ситуацій з сильними посухами в Україні.

Розглянута структура поля просторового розподілу блокуючих процесів в регіоні є осередненою для всіх років з посухами, але, зрозуміло, що в цій виборці є весняно-літні сезони, які відрізняються від загальної картини в усіх або деяких місяцях, але при цьому в Україні спостерігалися посухи. Для локалізації районів блокування в кожному році була визначена сумарна повторюваність блокуючих ситуацій (кількість від'ємних індексів блокування) для кожної довготи регулярної сітки регіону дослідження та проведено кореляційний аналіз між отриманими рядами за 16 років кожного з трьох місяців. Побудовані кореляційні матриці дозволили виявити схожі роки та ті, що відрізнялися від середньої структури розподілу індексів блокувань по довготах. Схожими за структурою блокування вважалися ряди з додатним значущим коефіцієнтом кореляції (для 5% рівня значущості).

На рис. 4.7 наведений розподіл індексів блокування по довготах за сезон в цілому та по окремих місяцях, осереднений по всіх роках зі значущими коефіцієнтами кореляції. Можна бачити, що сезонний центр блокування спостерігається на довготі  $35^{\circ}$  сх.д. (рис. 4.7, а). Частота блокування поступово зменшується на схід, на заході відмічається вторинний максимум на довготі  $10^{\circ}$  сх.д. Тобто, в роки з сильними посухами в Україні найбільша повторюваність блокуючих структур спостерігається саме над

центральною частиною країни, при цьому не можна виключати суттєвого впливу високої повторюваності блокуючих структур на заході.

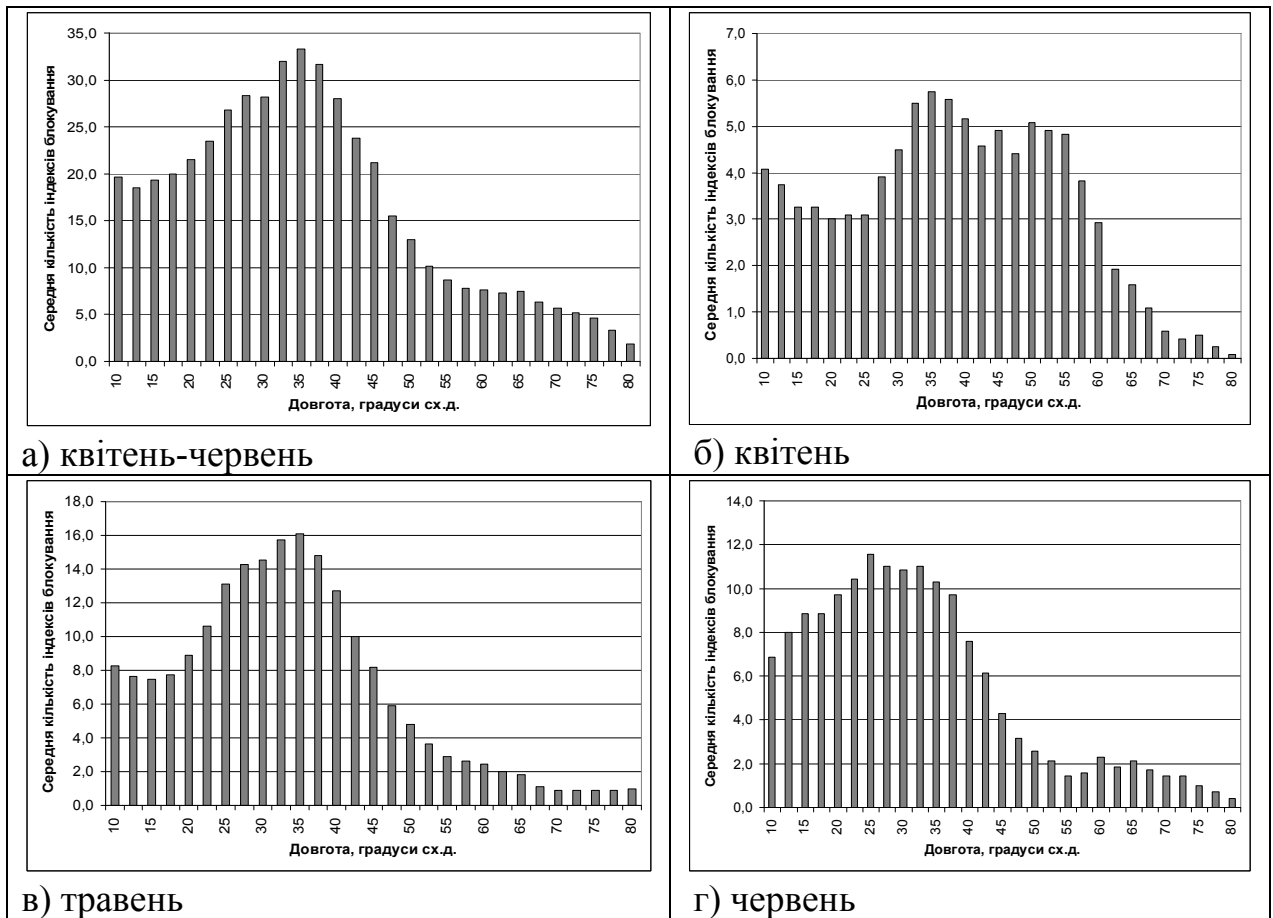


Рис. 4.7. Осереднений розподіл частот блокування у весняно-літньому сезоні (квітень-червень) при сильних посухах

Побудований по 12 роках типовий розподіл частот блокування у квітні має основний чіткий максимум на довготах  $32,5-37,5^{\circ}$  сх.д. та більш слабкий, вторинний на  $50-55^{\circ}$  сх.д. (рис. 4.7, б). На схід відбувається швидке зменшення повторюваності блокуючих структур, тоді як на крайньому заході відмічається ще один пік, пов'язаний зі стаціонарними гребенями азорського походження.

Типовий розподіл блокуючих структур у травні по 11 рокам осереднення має максимум повторюваності на  $32,5-35,0^{\circ}$  сх.д., тобто безпосередньо над районами України (рис. 4.7, в). Повторюваність



блокування швидко зменшується на схід і має менш чіткий, порівняно з квітнем, вторинний максимум на заході.

У червні довготний розподіл блокуючих структур найбільш неоднорідний і змінюється рік від року, про що свідчить загальне зниження тісноти кореляційного зв'язку. В типовому розподілі, побудованому по 7 роках (рис. 4.7, г), основний максимум повторюваності блокуючих процесів розташований у межах території України ( $25,0-35,0^{\circ}$  сх.д.) та наголошується слабкий вторинний максимум на довготі Уралу.

В табл. 4.2 наведені дані по розглянутих роках щодо довготних інтервалів, які відповідають центрам блокування, при цьому за наявності двох центрів в певному місяці в першій строчці вказаний основний максимум, в другій – вторинний. У квітні в 9 роках центр блокування спостерігався в межах України (в довготному інтервалі  $25-40^{\circ}$  сх.д.). В 7 роках центри блокувань розташовувалися на схід від  $40^{\circ}$  сх.д., в 6-ти – на захід від  $25^{\circ}$  сх.д. Квітень 1959 та 1972 рр. відзначився слабкими процесами блокування у досліджуваному регіоні – максимальна сума блокуючих ситуацій на центральних довготах не перевищувала 6 випадків, на більшості довгот дорівнювала нулю. У травні більшість спостережуваних центрів блокувань – 12, знаходилася у межах території України. Один випадок блокування спостерігався на схід від  $40^{\circ}$  сх.д., а ще 5 випадків – на захід від  $25^{\circ}$  сх.д. У червні також 12 центрів блокувань знаходилися безпосередньо над територією країни, але значно підвищилася, порівняно з травнем, кількість подвійних центрів – в 9 роках з 16-ти. При цьому 10 центрів блокувань розташовувалися на схід від  $40^{\circ}$  сх.д., а 3 – на захід від  $25^{\circ}$  сх.д.

Таким чином, в усіх посушливих роках характер погоди визначався наявністю блокуючих структур безпосередньо над територією України, при цьому майже в половині сезонів відмічено два центра блокування – один над Україною, другий на схід або захід від неї. Якщо у квітні та, особливо, у травні другий центр доволі часто знаходився над Західною Європою, в червні починають посилюватися блокуючі процеси на сході (Урал та схід ЄТР).

Порівняння географічного положення центрів посухи та центрів блокувань показує (див. табл. 4.2), що при переважанні осередків блокування над центром країни та на захід від неї посуха охоплює центральні і південні області. При переважанні східних процесів центри посухи зміщуються на східні області України. Низькою повторюваністю блокуючих структур відрізнявся травень 1951 р. та у меншому ступені 1950 р., що не виключає частого переміщення рухомих антициклонів без порушення загального західного перенесення в атмосфері.

#### 4.2.3. Стан зонального потоку під час блокування

Як вже відмічалось вище, найуживаніші індекси блокування Лейєнаса-Окланда і Тибальді-Монтені у деякій мірі відображують інтенсивність зонального потоку в середній тропосфері через показник меридіонального градієнту тиску, але безпосередньо зональна компонента швидкості вітру не розглядається.

В якості динамічного показника стану зонального потоку, пов'язаного з виникненням блокуючих процесів в атмосфері, веб-ресурсом The IRI/LDEO Climate Data Library пропонується експериментальний індекс блокування EBI (European Blocking Index), який розраховується за даними реаналіза NCEP - NCAR зональної компоненти вітру  $u$  на ізобаричній поверхні 300 гПа. Використовуються осереднені по пентадах поля у вузлах регулярної сітки з кроком  $2,5^\circ$  в Атлантико-Європейському регіоні, обмеженому координатами  $35-55^\circ$  пн.ш. і  $15^\circ$  зх.д. -  $25^\circ$  сх.д. Додатні значення EBI вказують на наявність блокування зональної течії, від'ємні – на посилення зонального перенесення відносно кліматичної норми, яка обчислюється за період 1971-2000 рр. Значення індексу близько  $\pm 1$  свідчать про екстремальні випадки стану повітряного потоку.

Оскільки індекс EBI розрахований для застосування в регіонах Західної Європи, в східній частині Європейського континенту його використання є

недоцільним. Тому уведемо новий індекс – Європейський континентальний індекс блокування ECBI (European Continental Blocking Index) [119], який розраховується в області, обмеженій координатами 40-60° пн.ш. і 10-60° сх.д., за формулою

$$ECBI = -\frac{\bar{u}_{pt}}{\bar{u}_{cl}} + 1, \quad (4.4)$$

де  $\bar{u}_{pt}$  – осереднене за площею регіону поточне пентадне значення зональної компоненти швидкості вітру на рівні 300 гПа;

$\bar{u}_{cl}$  – осереднене за площею регіону кліматичне значення зональної компоненти швидкості вітру (за базовим періодом 1981-2010 рр.).

Часовий хід обчисленого за формулою (4.4) пентадного індексу ECBI за період 1990-2013 рр. представлений на рис. 4.8. Можна бачити, що індекс зазнає чітко виражених коливань за часом. Періоди з екстремумами блокування наголошуються в 1991-1993, 1996, 2003, 2005, 2007 рр., при цьому до 2000 р. коливання носили більш виражений характер, в наступний період амплітуда коливань дещо зменшилася.

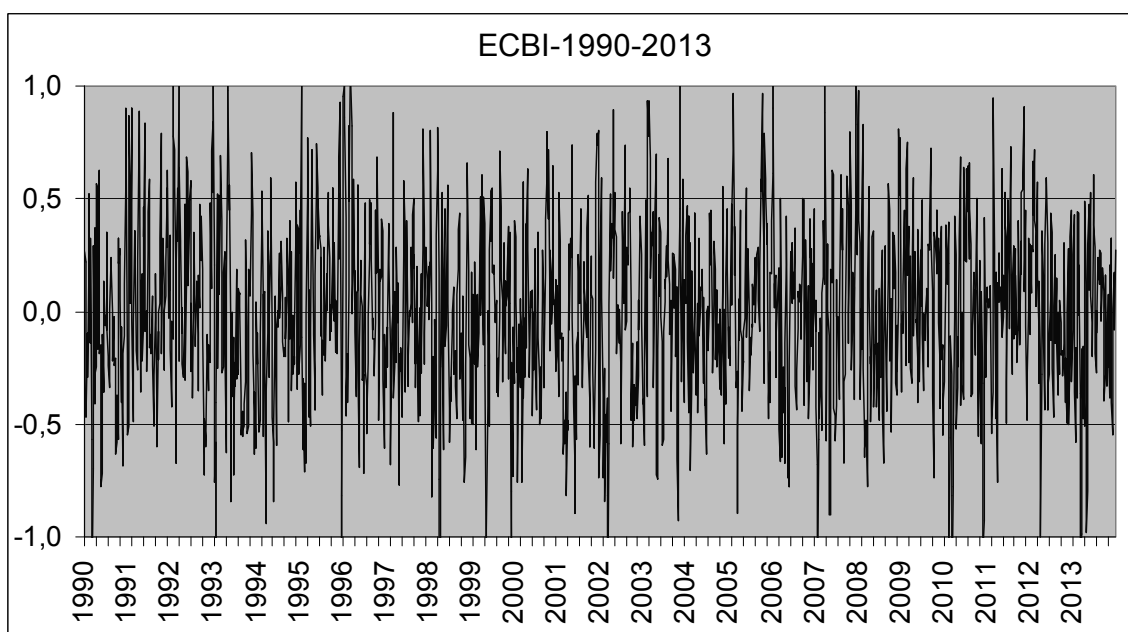


Рис. 4.8. Часовий хід індексу ECBI за період 1990-2013 рр.

Кількісний аналіз прихованих періодичностей за методом, що ґрунтується на інтегральному перетворенні Фур'є [120], виконаний для пентадного індексу за шестирічні часові проміжки показав, що можна виділити декілька значущих коливань в кожному з періодів (табл. Д.1). У 1990-1995 та 2002-2007 рр. виділялися найдовші значущі коливання з періодом 10,6 місяців. В усіх часових проміжках найбільшу амплітуду мали квазісезонні коливання з періодом від 2,2 до 3,2 місяця, які можна вважати найбільш важливими для цього індексу. У 2008-2012 рр. значущими були коливання з періодом близько 9 місяців. На усіх часових проміжках також простежуються відносно короткочасні коливання з періодичністю близько 1,5-1,8 місяця.

Для середньомісячних значень ЕСВІ виявлені квазісезонні коливання з періодом від 2,4 до 3,8 місяця, піврічні коливання з періодом майже 7 місяців та коливання з періодом близько 10 місяців.

Спектральний аналіз ЕСВІ показав, що середній період коливання індексу дорівнює 3,4 року, найбільш важливий пік - 2,1 року (рис. Д.1, а).

Вейвлет-перетворення на періоді 1900-2013 рр. визначило, що суттєві коливання індексу ЕСВІ з періодичністю близько двох років відбувалися на періодах 1997-1998 та 2007-2008 рр. (рис. Д.1, б).

Таким чином, запропонований індекс блокування ЕСВІ зазнає періодичних коливань протягом року, переважно узгоджуючись з сезонним станом загальної циркуляції атмосфери.

Частота появи індексів певного знаку або відповідних ситуацій блокування та посилення зонального перенесення у вегетаційний період важлива для оцінки умов формування врожаю сільськогосподарських культур. Діаграми повторюваності місячних індексів ЕСВІ, побудовані за допомогою Climate Explorer за досліджуваний період по сезонах, представлені на рис. 4.9. Розподіл місячних індексів ЕСВІ протягом року близький до нормального (рис. 4.9, а), з невеликою долею сумарного переважання від'ємних значень, які відповідають зональному стану регіональної

циркуляції. Найбільшу повторюваність має градація малих додатних значень індексу (до 0,2), що відповідає слабким процесам блокування. Протягом окремих сезонів вегетаційного періоду картина дещо інша. У весняно-літній сезон (квітень-червень) переважання мають блокуючі ситуації, що свідчить про високу повторюваність меридіонального характеру циркуляції в цей сезон (рис. 4.9, б).

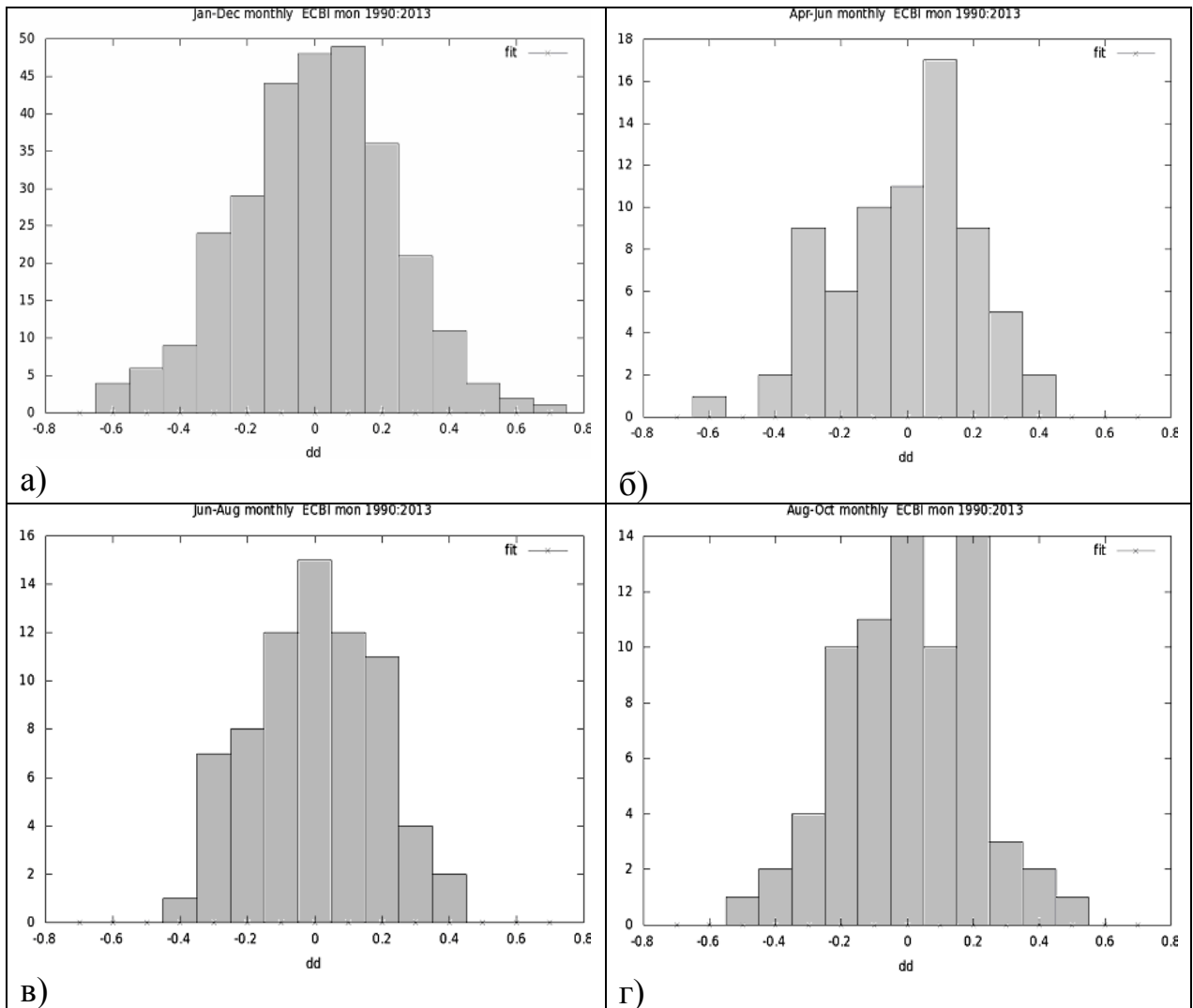


Рис. 4.9. Повторюваність місячних індексів ЕСВІ протягом року (а) та в окремі сезони вегетаційного періоду 1990-2013 рр.: весняно-літній (б), літній (в), літньо-осінній (г)

У літній період (червень-серпень) характер циркуляції загалом близький до кліматичного стану, розподіл індексів ЕСВІ близький до нормального (рис. 4.9, в). У літньо-осінній сезон (серпень-жовтень) знов починає переважати

меридіональний характер циркуляції і збільшується частота блокування зональної течії (рис. 4.9, г). Як й навесні, у цей період підвищується, порівняно з літом, частота додатних індексів з максимальними значеннями. Тобто, ситуації порушення зональної течії в регіоні у перехідні сезони більш інтенсивні та тривалі, ніж влітку. Переважання меридіонального типу циркуляції, як вже зазначалося, є одним з сприятливих факторів для утворення посух.

#### 4.3. Атмосферна циркуляція і значущі посухи в Україні у сучасний період

##### 4.3.1. Структура висотного поля тиску в періоди посух

Як показано в розділі 2, сучасний період метеорологічних спостережень характеризується підвищеною повторюваністю посух будь-якої інтенсивності у різні сезони. Майже кожного року принаймні в одній агрокліматичній зоні України посухи виникають в якийсь проміжок часу вегетаційного періоду, тобто в тропосфері Європейського сектору формується певна структура поля тиску, яка призводить до стійких аномалій в полях метеорологічних величин як на висотах, так й у поверхні землі.

Отже, можливо оцінити найбільш ймовірне регіональне поле тиску, притаманне саме для періодів посух в Україні у 1995-2012 рр. Для вирішення цієї задачі скористуємося методом оцінки полів за допомогою критеріїв аналогічності, алгоритм якого вже був описаний у п. 2.1.1 для визначення найбільш ймовірних полів ГТК.

Вихідними даними для розрахунку критеріїв аналогічності  $\rho$  та  $\eta$  слугували місячні сіткові поля H-500 реаналізу NCEP-NCAR, взяті по області  $\varphi=40-65^\circ$  пн.ш.,  $\lambda=0-60^\circ$  сх.д. для тих місяців, в які спостерігалися екстремальні значення індексів в сезони з посухами в Україні. У Додатку Е представлені дані щодо розрахованих критеріїв аналогічності, а також

відомості про мінімальні значення індексів посушливості SPI1, ГТК, осереднених по відповідних агрокліматичних зонах, які дають змогу оцінити ступінь посушливості в певний сезон відповідного року. Всього до вихідної вибірки було включено 28 місяців, з яких 9 місяців – весняні (квітень, травень), 8 місяців – літні (липень, серпень), 11 місяців – осінні (вересень, жовтень).

Аналіз розрахованих критеріїв аналогічності показав, що всі розглянуті місячні поля тиску характеризуються дуже високим параметром  $\rho$ , що вказує на їх приналежність до одного класу. Найбільш високе середнє значення  $\rho$  має поле вересня 2009 року – 0,963. Згідно індексів посух, в цей місяць в Поліссі спостерігалась сильна посуха за значенням ГТК та слабка посуха за значенням SPI1. На другому місці по значенню  $\rho = 0,962$  йде вересень 2005 року з сильною посухою в Поліссі. На цей же місяць припадає найменше значення критерію  $\eta = 0,0480$ , при цьому для вересня 2009 р.  $\eta$  незначно більше (0,0481). Таким чином, найбільш інформативними для періодів посух в Україні є місячні поля геопотенціальної висоти Н-500 вересня 2009 та 2005 років (рис. 4.10).

Як можна бачити, в обох випадках висотне поле тиску над Європою має східні риси і характеризується квазізональним розподілом в високих широтах, з вираженим гребенем в субтропічних широтах на захід від Піренейського півострова та відносно невеликими градієнтами тиску у широтній смузі 40-55° пн.ш. (рис. 4.10, а, г). При цьому в полі за 2005 р. територія України знаходиться в малоградієнтній області, але в обох випадках на схід від території країни наголошується барична улоговина, а на захід – менш виражений баричний гребінь. Поля аномалій Н-500 характеризуються наявністю осередку позитивних аномалій у широтній смузі 50-60° пн.ш., при цьому полі 2009 р. осередок роздрібнений принаймні на 3 окремих, з максимумом над Північною Атлантикою (рис. 4.10, б).

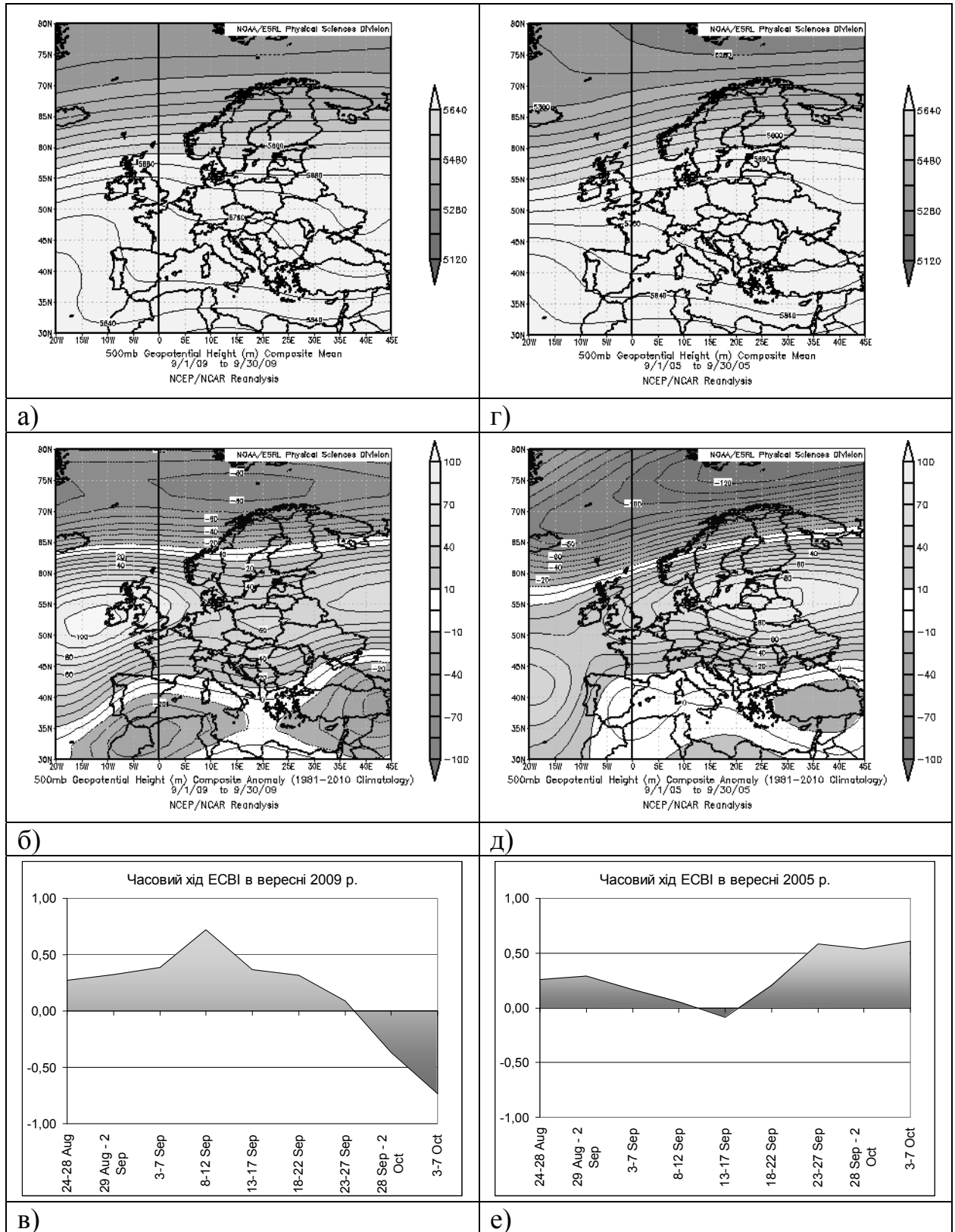


Рис. 4.10. Композитні поля геопотенціальної висоти Н-500, її аномалій та часовий хід індексу ЕСВІ за вересень 2009 р. (а, б, в) і 2005 р. (г, д, е)



У випадку 2005 року спостерігається єдиний осередок з центром над Прибалтикою (рис. 4.10, д), що вказує на більш інтенсивний процес антициклогенезу над континентом саме в цей рік, коли посуха була більш сильною порівняно з вереснем 2009 р.

Часовий хід індексу блокування ЕСВІ за обидва місяці показав, що у регіоні переважали процеси блокування зонального потоку протягом всього вересня (рис. 4.10, в, е), що відповідає загальній середньомісячній структурі висотного баричного поля з розщепленням потоку на північну та південну гілки (див. рис. 4.10, а, г). Середньомісячні значення ЕСВІ за вересень 2009 та 2005 років склали відповідно 0,26 та 0,25.

Таким чином, найбільш ймовірне місячне висотне баричне поле при посухах в Україні має наступні риси: 1) розщеплення зонального потоку на дві гілки – більш інтенсивну в північних районах Європи і менш інтенсивну над районами Середземномор'я; 2) формування субтропічного гребеня над Атлантикою на захід від Піренейського півострова; 3) малоградієнтне поле підвищеного тиску над територією України з вираженою баричною улоговиною над її східними районами.

У вибірці взятих для дослідження випадків виділяються два місяці – квітень 1996 р. та серпень 1999 р., через порівняно малі середні значення критерію  $\rho$  (0,634 та 0,626 відповідно). Хоча такі величини не дозволяють віднести ці поля до іншого класу, очевидно, що процеси посухи в ці місяці протікали в дещо інших циркуляційних умовах і такі випадки є рідкісними. Дійсно, структура полів аномалій Н-500 має інший вигляд (рис. 4.11): у квітні 1996 р. потужний осередок позитивних аномалій спостерігався на півночі Європи (Скандинавія і Прибалтика), захоплюючи райони Східної Європи (рис. 4.11, а). У серпні 1999 р. осередок позитивних аномалій геопотенціальних висот займав південь Європи (рис. 4.11, б). При цьому у квітні 1996 р. переважали процеси блокування (середньомісячний ЕСВІ = 0,10), а посуха в Поліссі розвинулась під дією антициклонів скандинавського походження. У серпні 1999 р. посуху на півдні України забезпечила

антициклонічна діяльність в районі Середземномор'я, яка протікала за відсутності блокування зонального потоку (середньомісячний ЕСВІ = -0,15).

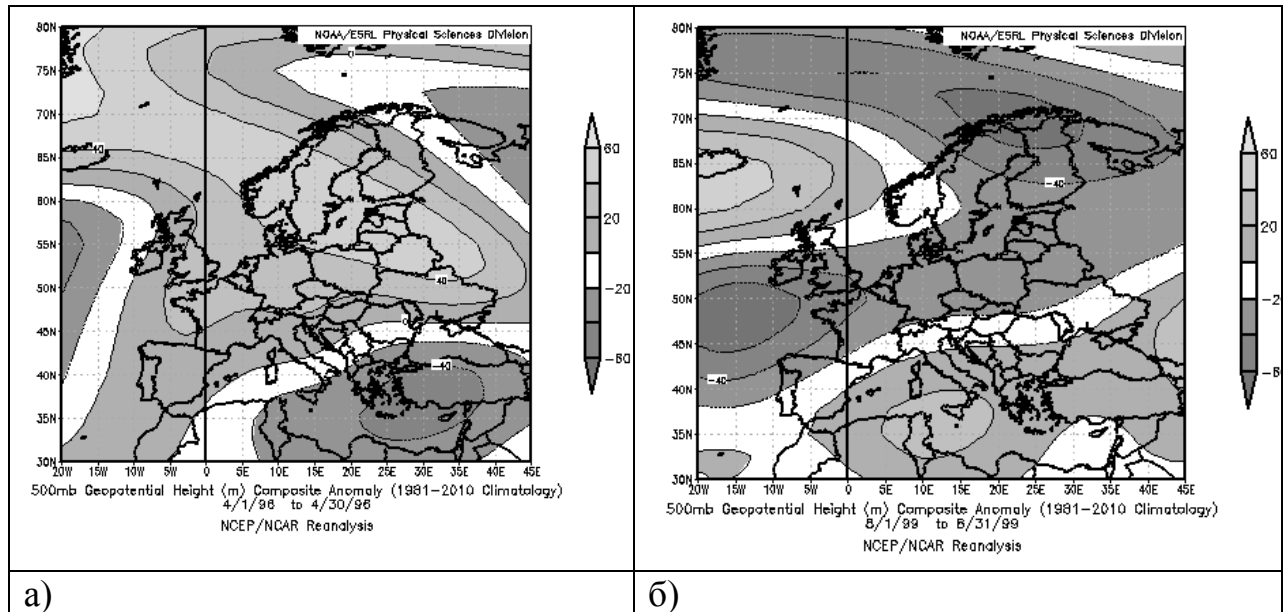


Рис. 4.11. Композитні поля аномалій геопотенціальної висоти Н-500 за квітень 1996 р. (а) та серпень 1999 р. (б)

#### 4.3.2. Повторюваність циклонічних процесів у зимовий період 1994-2012 рр.

Характер циклонічної діяльності в значній мірі визначає режим зволоження певної території через поля опадів, які пов'язані з циклонами, тому вивчення регіональних особливостей траєкторій і повторюваності циклонів займає важливе місце в синоптичній практиці та прогнозуванні явищ погоди, формування яких залежить від режиму опадів (у тому числі посух). Продуктивність рослин протягом вегетаційного періоду закладається вже навесні, при цьому важливу роль відіграють не тільки поточні погодні умови, але й вологовміст ґрунту, який був накопичений в попередній зимовий період.

Як відомо, на територію України у холодний період року переміщуються циклони з різних регіонів: південні (південно-західні) - з

районів Середземномор'я, західні – з районів Західної та Центральної Європи, північно-західні (північні або пірнаючі) – з районів Скандинавії та Баренцева моря [121, 122]. Південні і північно-західні циклони утворюються за меридіональної перебудови висотного поля тиску, причому еволюція пірнаючих циклонів над Східною Європою часто сполучається з блокуючими гребенями (антициклонами) над Західною Європою.

В зимовий період акваторія Середземного моря та прилеглі райони суші є місцем активного циклогенезу через сприятливі термодинамічні умови фронтогенезу та хвилеутворення на фронтах внаслідок складної орографії місцевості. Циклони починають виникати вже у жовтні, а у листопаді-грудні активно переміщуються на різні райони Європи, у тому числі й територію України, для якої є характерними дві групи циклонів, що пересуваються через: 1) Карпати з боку Угорської низовини, та 2) Чорне море з Балканського півострова і прилеглих районів. В зимові місяці акваторія Чорного моря є додатковим районом циклогенезу, що обумовлений як локальними фізико-географічними умовами, так й частим розповсюдженням в цей район циклонів (улоговин) з Середземного моря. Зимовий сезонний центр дії атмосфери під назвою „чорноморська депресія” особливо активний у січні, коли над континентом посилюються процеси антициклогенезу [123]. При утворенні штормової зони між заблокованим циклоном над Чорним морем та стаціонарним антициклоном, що посилюється над континентом, у південних областях України створюються умови для випадіння інтенсивних і тривалих опадів у вигляді снігу та дощу, спостерігаються ожеледі та хуртовини.

Пірнаючі циклони є менш повторюваними процесами і завдяки великій швидкості переміщення, характеру траєкторій і меншому загальному вологовмісту порівняно з південними циклонами, відіграють значну роль у режимі опадів переважно північних, центральних та східних областей України [124, 125].

Західні циклони, що переміщуються територією України, утворюються при зональному типі циркуляції, але не пов'язані безпосередньо з

атлантичними циклонами, які несуть великі запаси вологи. Траєкторії західних циклонів можуть проходити через південні, центральні або північні райони України [125], але через відносно невеликий розмір та глибину цих циклонів, опади отримують лише регіони вздовж траєкторії переміщення. Взимку повторюваність західних циклонів невелика внаслідок антициклонічних процесів, які переважають над континентом.

Внаслідок змін у циркуляції атмосфери в сучасний кліматичний період, як зазначалося вище (див. п.4.1.1), відбулися певні зміни у характері траєкторій баричних утворень на території України. В даному дослідженні надамо оцінку активності процесів циклогенезу в холодний період (листопад-березень) з 1994 по 2012 рік з метою подальшого порівняння з періодами настання посух у теплому сезоні. За допомогою синоптичних карт (приземних) був проведений суб'єктивний аналіз повторюваності циклонів: західних, південних, північно-західних (північних). В окрему групу були виділені депресії над Чорним морем, що утворювалися завдяки надходженню та стаціонаванню південних циклонів в цьому районі. Також були зафіксовані глибокі улоговини з атмосферними фронтами, що переміщувалися Україною. Такий тип циклонічних полів також є важливим фактором в формуванні режиму опадів, адже глибокі улоговини, орієнтовані в зимовий період, як правило, з північного заходу, півночі або північного сходу, пересуваються відносно повільно через всі регіони, при цьому на фронті можуть утворюватися хвилі, в зоні яких опади посилюються. Була підрахована лише кількість циклонів (улоговин) без урахування часу перебування об'єкту в межах території країни. Циклон вважався таким, що знаходиться над Україною в тому разі, якщо його центральна ізобара на приземній карті перетинала в будь-який момент часу будь-який регіон країни. Якщо центральна ізобара циклону знаходилася поза межами країни, а улоговина - у межах, випадок зараховувався до групи глибоких улоговин за наявності в улоговині атмосферного фронту. За відсутності синоптичних карт деяких місяців (1995-1997 рр.) аналіз проводився по картах реаналізу полів

приземного тиску. Відомості щодо повторюваності процесів кожної групи наведені у Додатку Ж (табл. Ж.1).

На рис. 4.12 представлені результати щодо повторюваності трьох типів циклонів та загальної повторюваності всіх розглянутих циклонічних полів. Можна бачити, що протягом розглянутого періоду спостерігалось поступове зменшення повторюваності усіх типів циклонічних утворень. Так, якщо з 1994 по 2000 роки в п'яти зимових сезонах з шести загальна кількість циклонічних полів перевищила 20 випадків (максимум в сезоні 1996-1997 рр. – 29 випадків), то в наступні шість сезонів (2000-2006 рр.) лише в двох кількості склала 20-22 випадки. Починаючи з зимового сезону 2006-2007 рр., коли відмічався мінімум повторюваності – 11 випадків, загальна кількість циклонічних полів не перевищувала 16 випадків.

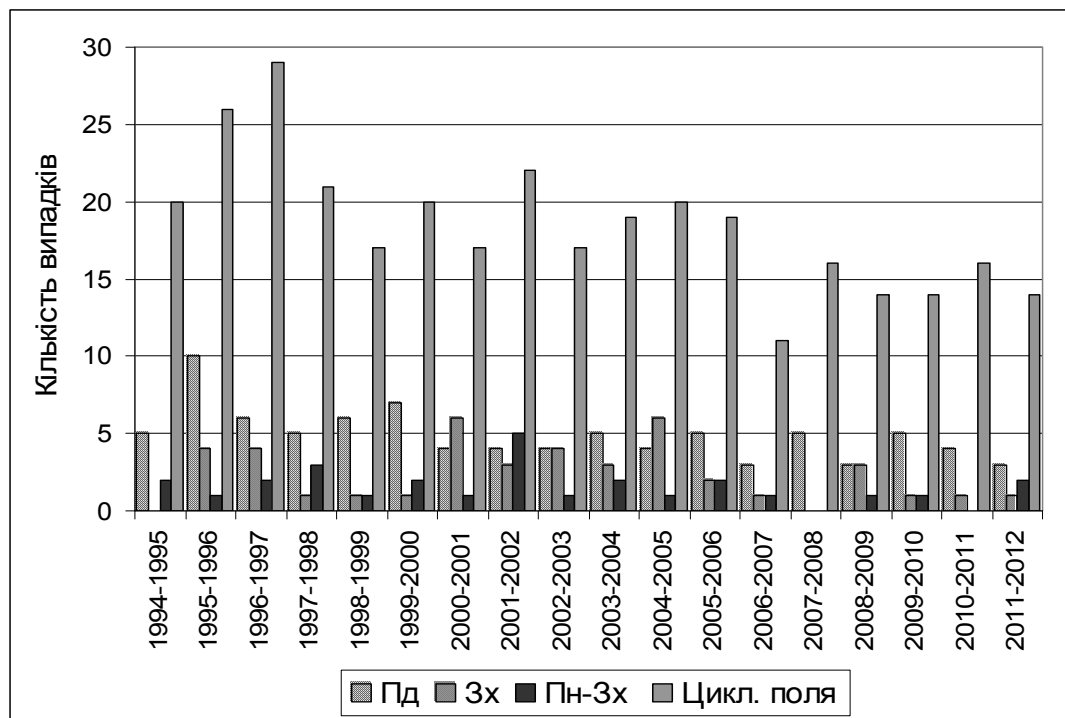


Рис. 4.12. Повторюваність циклонів різних типів (південних (Пд), західних (Зх), північно-західних (Пн-Зх)) та циклонічних полів (Цикл. поля) загалом у холодні сезони 1994-2012 рр.

Аналіз повторюваності окремих типів циклонів показав, що головний внесок в сумарну повторюваність дають південні циклони – майже в усі

сезони їх повторюваність значно перевищувала інші типи циклонів, а їх середня повторюваність склала 4,9 циклони на сезон. Середня повторюваність західних циклонів майже вдвічі менше – 2,3 циклони на сезон, а північно-західних всього 1,3 циклони на сезон. Як можна бачити (див. рис. 4.12), на відміну від південних циклонів, які спостерігалися кожний сезон, західні та північно-західні циклони в деякі роки були відсутні (1994-1995, 2007-2008, 2010-2011 рр.).

Важливу роль відіграють також глибокі улоговини – їх кількість складає близько 1/3 всіх випадків циклонічних полів і, в середньому, дорівнює близько 6 випадків на сезон. Найбільша кількість улоговин (12) спостерігалася у зимовий період 1996-1997 рр., який характеризувався найбільш активною циклонічною діяльністю.

Окремо розглянемо повторюваність південних циклонів та чорноморських депресій, сумарна кількість яких представлена на рис. 4.13. Слід зазначити, що сумарна кількість цих об'єктів становить половину всіх розглянутих циклонічних полів (див. табл. Ж.1).

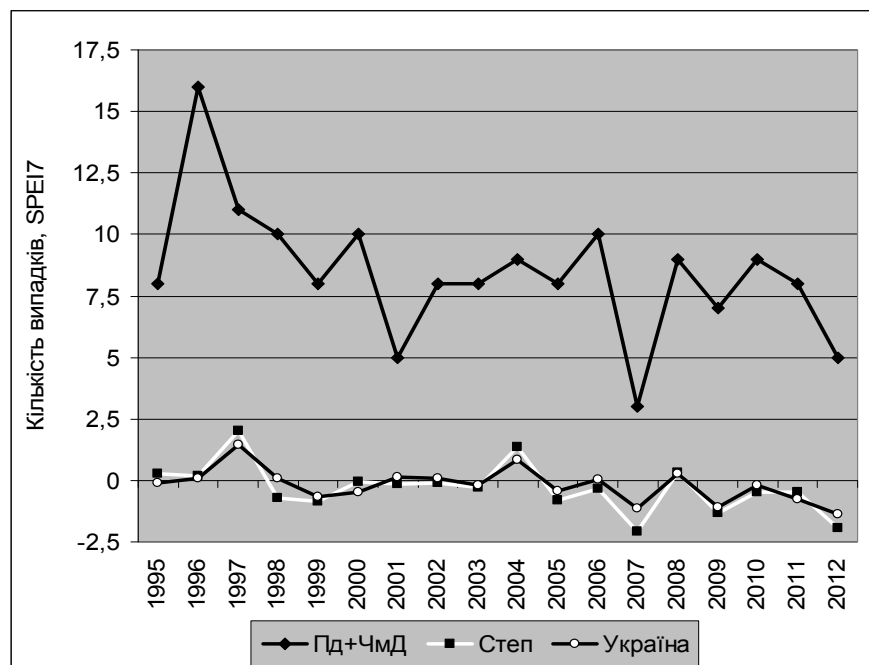


Рис. 4.13. Сумарна повторюваність південних циклонів (Пд) і чорноморської депресії (ЧМД) у холодні періоди та значення індексу SPEI7 за теплі сезони 1995-2012 рр. в Степу та Україні загалом

Можна бачити, що спостерігалася загальна тенденція до зменшення кількості південних циклонів та депресій протягом періоду, що розглядається. Максимум повторюваності – 16 випадків, прийшовся на зимовий сезон 1995-1996 рр. У наступний період кількість циклонів поступово зменшувалася, і в поточному столітті становила в середньому 8 випадків на сезон. Мінімум спостерігався у 2006-2007 рр. – всього 3 випадки, що передувало одній з найсильніших посух в Україні в досліджуваному періоді.

Порівняння повторюваності південних циклонів та чорноморських депресій у холодний період зі ступенем посушливості наступного вегетаційного періоду, який визначався за індексом SPEI7 (квітень-жовтень), не дає однозначного зв'язку між зменшенням кількості циклонів і настанням посухи (див. рис. 4.13). Але слід відмітити, що визначена тенденція до зменшення кількості циклонів в останнє десятиліття співпадає зі збільшенням посушливості вегетаційних періодів, особливо в Степу. В цій агрокліматичній зоні, починаючи з 2005 року, кожний теплий сезон, окрім 2008 року, характеризувався посухою тієї чи іншої інтенсивності.

Таким чином, в досліджуваній період мали місце суттєві зміни у характері синоптичних процесів холодного сезону, які позначилися на загальному послабленні циклонічної діяльності над територією України, особливо на початку поточного століття, що, ймовірно, підвищило ризик настання посух у теплий сезон.

#### 4.3.3. Синоптичні процеси в періоди посух

Початок XXI століття відзначився декількома інтенсивними посухами, які охоплювали значну частину території України у різні місяці вегетаційного сезону. До таких випадків можна віднести такі періоди [56, 60, 126]: весняна посуха 2002, 2003 років, весняна та літня посуха 2007, 2009, 2012 років, осіння посуха 2011 року. Для стислого описання синоптичних процесів, які переважали під час посух, застосуємо класифікацію макропроцесів

Б.Л. Дзердзеевського [127], основними поняттями якої є елементарні циркуляційні механізми (ЕЦМ), тобто характерні синоптичні ситуації у Північній півкулі, які мають певні ознаки за розташуванням циклонів і антициклонів, наявністю і кількістю блокуючих процесів та закономірностей при переході від одного до іншого типу ЕЦМ. За цією класифікацією групою вчених Інституту географії РАН створений та постійно оновлюється календар послідовної зміни ЕЦМ, започаткований у 1899 р. У класифікації виділено 4 групи циркуляції, 13 типів та 41 підтип циркуляційних процесів, сучасний детальний опис яких можна знайти в монографії Н.К Конової [128] та на сайті <http://atmospheric-circulation.ru>.

Для східної половини Європейського сектору, де розташована територія України, з основних процесів півкулі виділяють чотири групи циркуляційних процесів [129], відомості про які наведені у табл. 4.3. У таблиці сірим кольором виділені типи ЕЦМ, за яких над територією України у поверхні землі переважає антициклонічне поле. Перші літери біля номера ЕЦМ позначають підтип процесу, другі літери („з” та „л”) відмічають приналежність процесу до зимового або літнього періоду відповідно.

Таблиця 4.3

## Розподіл ЕЦМ по групам циркуляції для Східної Європи

Група циркуляції	ЕЦМ
Широтна західна	2в, 5а, 5в, 6, 7ал, 7бл, 8вз, 11а, 11б, 11в, 11г, 12г
Довготна північна	4а, 4б, 4в, 10а, 10б
Довготна південна	1а, 1б, 2а, 2б, 3, 5б, 5г, 7аз, 7бз, 8вл, 8гз, 8гл, 9а, 9б, 12бл, 12вл, 13з, 13л
Довготна північна + довготна південна	8а, 8бз, 8бл, 12а, 12бз, 12вз



Надамо коротку характеристику груп циркуляції, згідно [129], для наступного використання в описанні синоптичних процесів, за яких розвивалися посухи в Україні.

До широтної (або зональної) західної групи відносять такі ЕЦМ, за яких у високих широтах переміщуються атлантичні циклони, а в більш південних широтах спостерігається антициклонічний режим циркуляції, обумовлений відрогами азорського антициклону (влітку) або сибірського максимуму (взимку). При слабкому розвитку гребенів, на південь Східної Європи можливі виходи середземноморських циклонів. В арктичному басейні добре розвинута тропосферна область низького тиску.

До довготної північної групи входять ЕЦМ, за яких над Східною Європою формується блокуючий процес. Утворення меридіонально орієнтованої смуги підвищеного тиску відбувається в умовах арктичного вторгнення в тилу глибоких атлантичних циклонів. Влітку така смуга часто поєднується з відрогом азорського антициклону, взимку – сибірського. Як можна бачити з табл. 4.3, всі типи ЕЦМ, які представляють цю групу, характеризують наявність антициклонічного поля над Україною.

Довготна південна група об'єднує ЕЦМ, які відповідають умовам виходу середземноморських циклонів на Чорне море або Чорноморське узбережжя Кавказу. Подальші шляхи цих циклонів часто проходять через територію України. Оскільки траєкторії переміщення циклонів та антициклонів при меридіональних процесах повністю визначаються довготним положенням висотних улоговин/гребенів, з 18 різноманітних ЕЦМ, що входять до цієї групи, лише половина ЕЦМ відповідає умовам антициклогенезу над Україною. Решті дев'ять ЕЦМ характеризують ситуації, сприятливі для виходу південних циклонів через територію країни.

Група циркуляції „довготна північна + довготна південна” об'єднує складні меридіональні процеси, за яких на одних довготах в межах європейського сектора відбувається вихід південних циклонів, а на інших довготах в тилу південних циклонів цього сектору або сусіднього формується

блокуючий гребінь. В цій групі лише один тип ЕЦМ (8бз) характеризує антициклонічну циркуляцію над Україною, інші відповідають циклонічному приземному полю.

### 2002 рік

Помірна посуха охопила у квітні-червні степову зону України, менш інтенсивні посушливі умови склалися в Лісостепу та Поліссі. Висока повторюваність антициклонічної циркуляції у квітні-травні призвела до раннього сходу снігового покриву та швидкого висушування поверхні ґрунту. В ці місяці на ЕЦМ, які не сприяють випадінню опадів (3, 4б, 6, 9а, 10б і 13л), припало 19 та 17 днів відповідно. У червні сумарна тривалість ЕЦМ, що характеризують антициклонічну циркуляцію, становила 26 днів.

Локалізація осередків блокування в весняно-літній період спостерігалася в широтній смузі 52,5-62,5° пн.ш., з трьома максимумами, один з яких знаходився на північному заході України (27,5-35,0° сх.д.) (рис. 4.14, а).

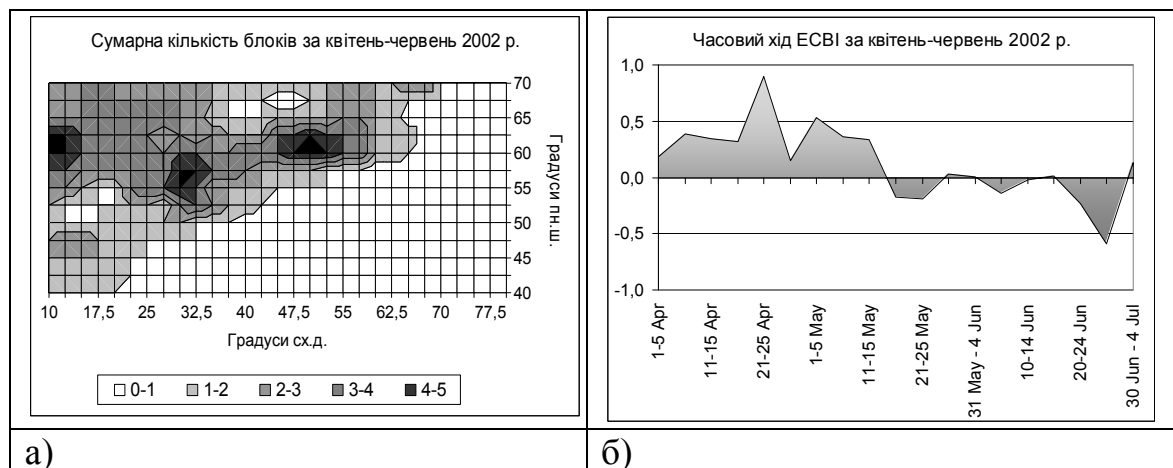


Рис. 4.14. Повторюваність блоків (а) та часовий хід індексу ЕСВІ (б) у квітні-червні 2002 р.

Часовий хід індексу ЕСВІ свідчить про наявність регіонального блокуючого процесу протягом квітня і в першій половині травня (рис. 4.14, б). У другу половину травня та протягом червня процесів блокування не спостерігалася.

## 2003 рік

Весняна посуха 2003 р. переважно помірної інтенсивності охопила усі основні агрокліматичні зони України та призвела до найбільшого за розглянутий період зниження урожайності озимої пшениці - на 11-12 ц/га від тренду у середньому по Україні. Посуха також негативно вплинула й на ярові культури.

У квітні характер атмосферної циркуляції був нестійким і визначався частою зміною баричних полів. При цьому на типи ЕЦМ, які відповідають антициклонічній циркуляції над Східною Європою (13з, 13л, 3, 2б, 8 гл), доводилося 12 днів. Найбільшу повторюваність мали форми ЕЦМ 12 (а, бл), за яких над Північною Атлантикою виникає блокуючий гребінь, а над Європою формується глибока улоговина. Вихід південного циклону на територію України спостерігався лише у першій декаді місяця, потім переважали гребені східного або західного походження. Травень розпочався арктичним вторгненням на східні райони ЄТР в тилу глибокого циклону та виникненням і активним посиленням антициклону над Україною. Протягом місяця переважали ЕЦМ, за яких Східна Європа опиняється в антициклонічних полях (8а, 9а, 6, 7ал). Стаціонарний континентальний гребінь з південного сходу проіснував до кінця місяця, трохи послаблюючись 18-20 травня (ЕЦМ 12а) за рахунок розвитку інтенсивної циклонічної діяльності над Західною Європою. У червні також переважали ЕЦМ з антициклонічною циркуляцією або малоградієнтним полем над Україною – 13л, 2а, 2в, а також ЕЦМ 12 типу, за яких Україна знаходилася переважно на східній периферії висотної улоговини з виносом теплих повітряних мас середземноморського походження. Основна циклонічна діяльність була зосереджена над Північною Атлантикою. Проходження активного атмосферного фронту з утворенням циклону спостерігалось 17-19 червня (ЕЦМ 8бл) та 22-24 червня (ЕЦМ 12а), потім встановився антициклонічний характер циркуляції.

Основні сезонні блокуючі процеси були зосереджені на північний захід від території України та пов'язані з розвитком у північному напрямку відрог азорського антициклона у квітні-травні (рис. 4.15, а). Формування гребня над сходом ЄТР у червні доповнило осередок блокування на 50-55° сх.д.

У часовому ході індексу ЕСВІ виділяється тривалий період блокування у середині квітня – понад 2 тижні, а також протягом майже всього травня (рис. 4.15, б), що вкупі з антициклонічним приземним полем призвело до встановлення сухої та малохмарної погоди з сильним прогріванням повітря, внаслідок чого сформувалася посуха. Хоча протягом червня блокування було відсутнє, в Україні спостерігалися периферійні антициклонічні процеси, які постійно змінювали один одного, підтримуючи погоду переважно без опадів.

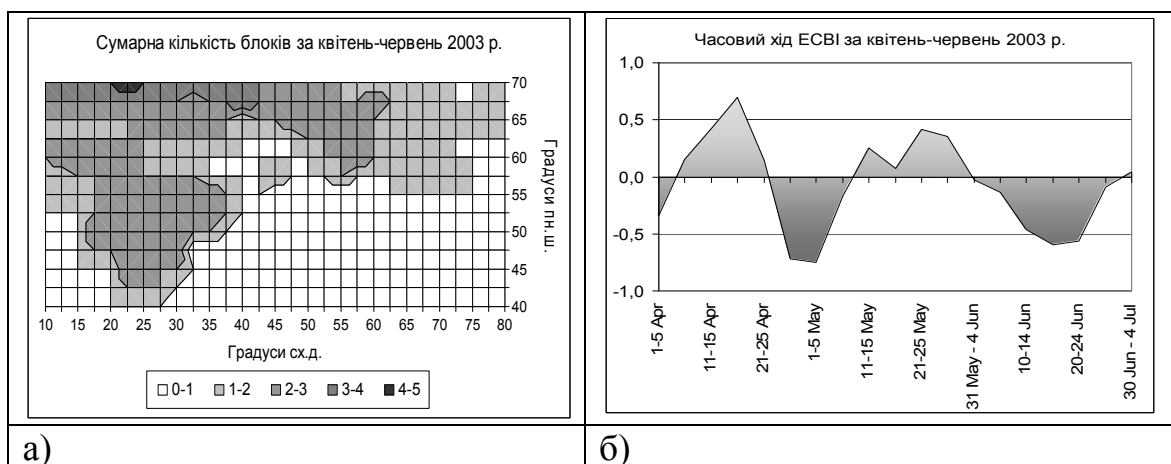


Рис. 4.15. Повторюваність блоків (а) та часовий хід індексу ЕСВІ (б) у квітні-червні 2003 р.

### 2007 рік

Виключно інтенсивна посуха у 2007 р. охопила всі основні агрокліматичні зони України навесні, влітку вона тривала в Степу та Лісостепу. Інтенсивність посухи у квітні-червні досягала критерію сильної в Степу та помірної в Лісостепу. У літні місяці інтенсивність посухи зменшилася до слабкої в лісостеповій зоні, та залишилася майже незмінною в степових областях.

Вже 1 квітня над Україною сформувався антициклон за ЕЦМ 13л, який існував протягом 14 днів. У наступні місяці, протягом літа переважали ЕЦМ 12-х типів, а також 3 та 9а, сумарна тривалість яких в декілька разів перевищувала середню багаторічну. За цих ЕЦМ значного розвитку у східному напрямку набуває азорський антициклон, який підживлюється арктичними вторгненнями, тому у 2007 році спостерігалось часте розповсюдження його відрогів на територію України.

Центр сезонного осередку блокування розташовувався в широтній смузі  $55,0-60,0^{\circ}$  пн.ш., у межах  $10,0-37,5^{\circ}$  сх.д. (рис. 4.16, а). При цьому спостерігалася незначна широтна міграція осередку, що призвело до високої частоти блокування в одному регіоні. Навесні центр блокування був невеликим за площею і локалізувався над північчю України. Наприкінці літа площа розповсюдження осередків блокування значно розширилася при зберіганні тієї ж частоти.

Часовий хід індексу ЕСВІ показав, що протягом квітня-серпня поява блокуючого процесу мала чітку періодичність у 3-5 пентад, внаслідок чого регіон був під впливом блоків у середині квітня, з середини травня до початку червня, з кінця липня й до кінця серпня (рис. 4.16, б).

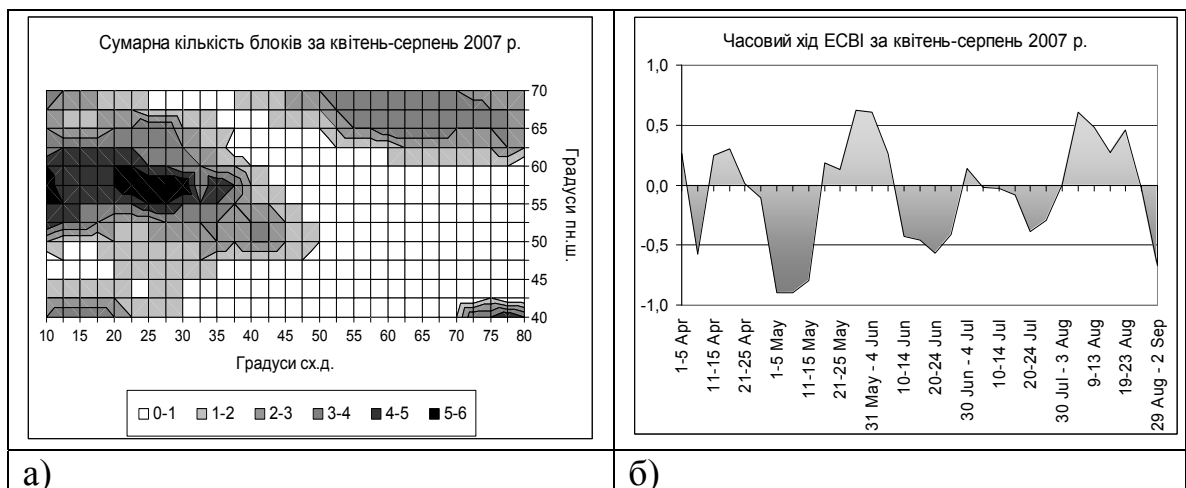


Рис. 4.16. Повторюваність блоків (а) та часовий хід індексу ЕСВІ (б) у квітні-серпні 2007 р.

## 2009 рік

У 2009 р. літня посуха спостерігалася у степовій та лісостеповій зонах України. Посушливі явища почали розвиватися з середини травня, тому у весняний період інтенсивність посухи була слабкою, але влітку в Степу посуха досягала вже критеріїв сильної.

З кінця травня за ЕЦМ 12а, 12бл і 12вл, які змінювали один одного протягом всього червня (в сумі 26 днів), арктичне повітря проникало далеко на південь Західного Сибіру і підтримувало зберігання антициклонічної циркуляції, яка поширилася на південь Східноєвропейської рівнини. У липні такі ж самі процеси зайняли 19 днів, підтримуючи антициклонічну погоду в регіоні. В 14 днях переважали стаціонарні антициклонічні процеси за ЕЦМ 2а, 9а, 13л. У серпні за ЕЦМ 13л, при розповсюдженні на схід відрог азорського походження сформувався антициклон над Україною. Підживлюючись арктичними вторгненнями через Західну Європу, антициклон розвився та поширився на всю Східну Європу, внаслідок чого загальна тривалість антициклонічних ЕЦМ (2а, 8гз, 13л) склала 13 днів.

Розподіл осередків блокування в червні-вересні неоднорідний, має широтну спрямованість вздовж  $50-55^{\circ}$  пн.ш. з окремими центрами близько  $10, 32,5$  та  $60^{\circ}$  сх.д. (рис. 4.17, а). Інтенсивний осередок блокування на північному сході регіону сформувався наприкінці літа, порушуючи зональне перенесення над північним Уралом та Західним Сибіром.

Часовий хід індексу ЕСВІ показав наявність блокування з кінця травня і протягом майже всього червня (рис. 4.17, б). У липні та серпні переважали процеси зонального перенесення, які сприяли розповсюдженню відрог азорського антициклона в напрямку України. Тривалий епізод блокування почався у третій декаді серпня і тривав до кінця вересня, супроводжуючись формуванням потужного антициклону над Уралом та сходом ЄТР.

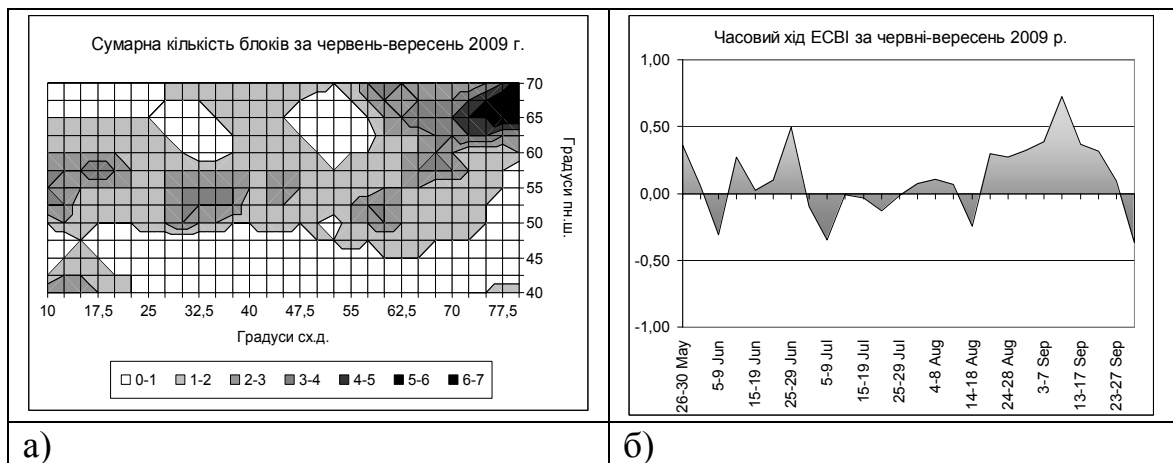


Рис. 4.17. Повторюваність блоків (а) та часовий хід індексу ЕСВІ (б) у червні-вересні 2009 р.

### 2011 рік

Осінь 2011 р. в Україні відзначилася аномально сухою та прохолодною погодою, що призвело до формування рідкісної в цю пору року атмосферної та ґрунтової посухи на значній частині території країни [126]. Великих збитків зазнало сільське господарство – на третині засіяних площ озимі не зійшли, внаслідок чого навесні довелось пересівати значну частину полів.

Дефіцит опадів формувався протягом всієї осені – якщо у вересні в західних та центральних областях опадів випало 18-42% від норми, то у листопаді на заході та півдні країни кількість опадів склала близько 5% від норми, при цьому цей місяць виявився ще й відносно холодним. Кількість бездошових періодів за серпень-листопад 2011 р. становила від 3 до 5 по різних пунктам, а сумарна кількість днів у них коливалась від 55 в Харкові до 87-89 в Тернополі та Одесі.

Протягом трьох осінніх місяців територія України знаходилася під частим впливом антициклонічних систем різної тривалості і походження. В вересні високу повторюваність мали ЕЦМ, яким відповідає антициклонічний характер циркуляції (типи 5а, 8вл, 8гз, 11а, 13з) – всього 15 днів, при цьому спостерігалися навіть зимові варіанти процесів. В інших періодах спостерігалися такі різновиди ЕЦМ 12 типу (12бл, 12бз), за яких територія

України знаходилася на східних периферіях південних циклонів в зоні адвекції теплого та відносно сухого середземноморського повітря.

У жовтні антициклонічні ЕЦМ спостерігалися протягом 12 днів (типи 7аз, 8а, 8бз, 11г, 12г, 13з) з переважанням північно-західних антициклонів Скандинавського походження, переміщення яких супроводжувалося адвекцією холодного і сухого арктичного повітря. Єдиний південний циклон 9-10 жовтня забезпечив понаднормові суми опадів в деяких пунктах України, які, тим не менш, не покращили загальну ситуацію зі зволоженням ґрунту.

У листопаді циклонів не спостерігалося взагалі, антициклонічні ЕЦМ були присутні протягом 19 днів, при цьому переважали південні і східні периферії північно-західних і північних антициклонів, які постійно регенерували над північними районами Європи і Скандинавією (відповідні типи ЕЦМ 8вз, 8гз, 11г). Також, спостерігався ЕЦМ типу 12г, який характеризується утворенням стійкої смуги підвищеного тиску над південною половиною Європи.

Блокуючі процеси, як можна бачити на рис. 4.18, а, були зосереджені над Західною та Центральною Європою, при цьому стійкий процес блокування почався у середині жовтня і посилювався до середини листопада, триваючи впродовж всього місяця (рис. 4.18, б).

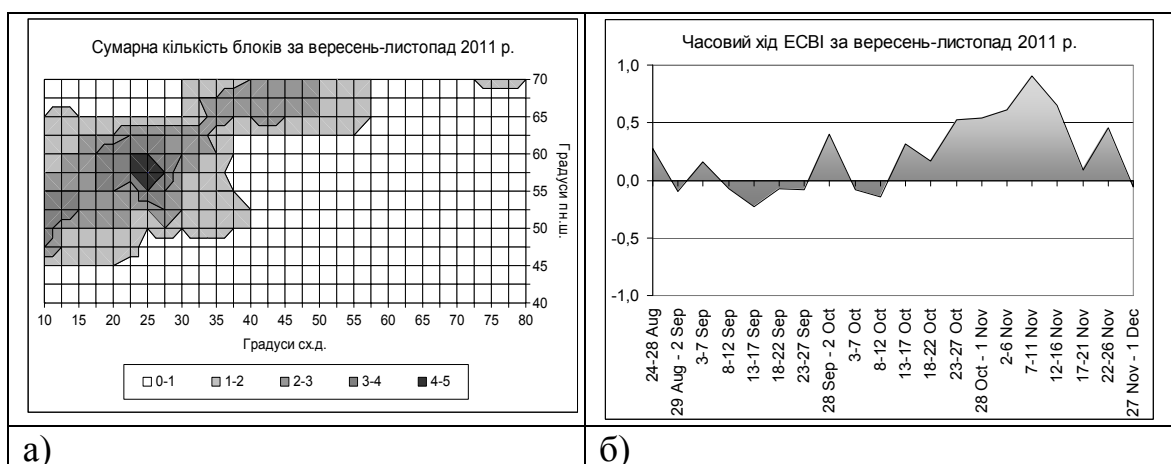


Рис. 4.18. Повторюваність блоків (а) та часовий хід індексу ЕСВІ (б) у вересні-листопаді 2011 р.



Уявлення про переважання антициклонічного характеру циркуляції восени 2011 р. дає карта-схема траєкторій антициклонів за вересень-листопад (рис. Ж.1). Можна бачити, що в перші два осінні місяці переважали антициклони західного типу, які формувалися над районами Західної та Центральної Європи та в зональному потоці пересувалися на схід з північною або південною складовою. Значна частина антициклонів проходила безпосередньо через територію України або навіть стаціонувала в її межах. Лише в листопаді відбулася суттєва перебудова висотного баричного поля, яка супроводжувалася блокуванням зонального потоку (див. рис. 4.18, б) та зміною траєкторій антициклонів на північно-західні та північні. Даний випадок є яскравим прикладом того, що процеси блокування не є достатньою умовою утворення тривалої посухи в Україні, адже дефіцит опадів може сформуватися також завдяки частому перебуванню на певній території транзитних антициклонів, які пересуваються у зональному (не блокованому) потоці.

### **2012 рік**

Сезонна посуха 2012 р. спостерігалася в країнах південного сходу Європи та Балканського півострова. Протягом весни та літа посухою були охоплені степові та лісостепові райони України, при цьому у південних областях посуха досягала критеріїв помірної та сильної.

Протягом квітня-серпня у циркуляційних процесах переважали ЕЦМ з арктичними вторгненнями на Західну Європу та Західний Сибір (типи 8а, 8бл, 8гл, 12а, 12бл), а також ЕЦМ, що сприяють формуванню стаціонарного антициклону на півдні Східноєвропейської рівнини (типи 2а, 2б, 3, 6). Найбільш інтенсивними та згубними виявилися посухи в тих регіонах, по яких проходили арктичні вторгнення. У квітні повторюваність антициклонічних ЕЦМ була невеликою – всього 5 днів, у травні кількість днів збільшилася до 15, при цьому переважали типи ЕЦМ західного та південного спрямування (типи 3, 6, 9а, 13л). В першій місяць літа інтенсивність антициклонічної циркуляції досягла максимуму – протягом 26 днів у червні

спостерігалися антициклонічні ЕЦМ (типи 2а, 3, 9а та 13л). Найбільшу повторюваність мали ЕЦМ 9а та 13л, пов'язані з утворенням стаціонарного антициклону над півднем Східної Європи. У липні та серпні антициклонічний характер циркуляції над Україною зберігався, а відповідні ЕЦМ (типи 2а, 3, 6, 9а, 12г, 13л) спостерігалися протягом 20-21 дня кожного місяця.

У сезонному просторовому розподілі блокуючих ситуацій виділяються два осередки – один над Східною Європою, другий над північчю Уралу (рис. 4.19, а). Осередок з центром над північними районами України утворився завдяки високій повторюваності блокуючих ситуацій у травні та липні. У квітні найбільшу повторюваність мали блоки в районі Нижнього Поволжя, а у червні – тільки над північчю Уралу. У серпні блокуючі ситуації з'являлися з однаковою частотою над різними районами Європи (по 1-2 випадки), що сприяло підтримці антициклонічного характеру циркуляції атмосфери по всьому регіону.

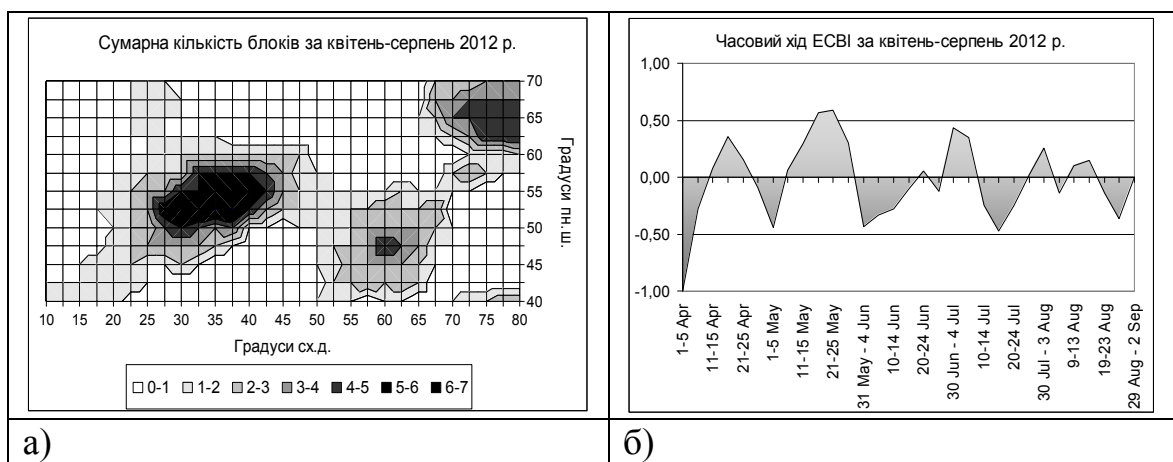


Рис. 4.19. Повторюваність блоків (а) та часовий хід індексу ЕСВІ (б) у квітні-серпні 2012 р.

У часовому ході індексу ЕСВІ головний епізод блокування спостерігався у травні (рис. 4.19, б). Протягом червня-серпня періоди блокування були нетривалими і малоінтенсивними, що свідчить про встановлення антициклонічного характеру циркуляції за рахунок розвитку та

розповсюдження азорського антициклону на схід, як це спостерігалось у 2007 році.

Розглянуті особливості атмосферного блокування під час значущих посух в Україні дозволили зробити такі висновки.

1. На формування стійкого і поширеного осередку посухи процес блокування впливає в тих випадках, якщо його тривалість становить 4 і більше пентад протягом місяця. При цьому основний центр осередку блокування лежить, як правило, на північний захід від області посухи.

2. Довготривалі процеси блокування одного місяця можуть мати подовжену дію в розвитку та/або зберіганні посухи в наступному місяці, навіть якщо блокування припинилося. Такі умови добре простежуються на весняних посухах 2002-2003 рр., коли процесу блокування у квітні-травні було достатньо, щоб сформувати посуху, яка трималася ще у червні.

3. „Динамічні” посухи в Україні можуть виникати й без процесу блокування в тому разі, якщо тривалий період територія країни опиняється під впливом рухомих антициклонів переважно західного типу або смуг підвищеного тиску, які утворюються у південній половині Європи при встановленні зонального типу макроциркуляції і розвитку активної циклонічної діяльності у високих широтах. Такі процеси є вельми стійкими і, в залежності від сезону року, можуть формувати дефіцит опадів на фоні як високих, так й низьких температур повітря.

#### 4.4. Енергетичний стан атмосфери під час посух

Енергетичні запаси та перетворення різних видів енергії є одними з найважливіших показників еволюції атмосферних процесів різних масштабів, які входять до ланок загальної циркуляції атмосфери (ЗЦА). В теорії ЗЦА основною проблемою є визначення механізму перетворення внутрішньої енергії, яка утворюється в атмосфері Землі за рахунок припливу тепла від Сонця, на кінетичну.

В атмосферних процесах найбільшу роль відіграють кінетична (К), потенціальна (П) та внутрішня ( $E_v$ ) енергії, які сумарно складають повну енергію. Для атмосфери як замкненої системи, повна енергія залишається незмінною, адже нагрівання за рахунок сонячної радіації, що поглинається, практично компенсується вихолодженням за рахунок довгохвильової радіації, яка випромінюється в космічний простір. Повітряні рухи різних масштабів є механізмом, за рахунок якого в атмосфері відбуваються перетворення кінетичної енергії, яка, в свою чергу, є єдиним джерелом та стоком внутрішньої енергії. Вертикальні рухи призводять до перетворення потенціальної енергії на кінетичну та навпаки. Рухи у горизонтальній площині призводять до взаємного перетворення внутрішньої та кінетичної енергії. Ці процеси є адіабатично і термодинамічно оберненими та протікають з різною інтенсивністю, що забезпечує нульовий баланс виробленої та дисипованої за рахунок тертя кінетичної енергії.

Дослідження фізичних механізмів перетворення енергії в атмосфері показали, що на атмосферні рухи, тобто утворення кінетичної енергії, йде лише мала частка так званої лабільної енергії ( $\Pi + E_v$ ), яка утворюється завдяки припливу сонячної радіації [130]. Доля цієї енергії складає близько 0,06% від лабільної енергії. Фундаментальним внеском до теорії енергетики атмосфери стало уведення Е.Н. Лоренцом [131] поняття доступної потенціальної енергії (ДПЕ), яка визначає кількість лабільної енергії, що здатна перетворитися на кінетичну через адіабатичні перетворення. Генерація ДПЕ відбувається за рахунок припливу тепла через різноспрямовані вертикальні рухи, які зумовлюють горизонтальну температурну неоднорідність на певному рівні та зменшують статичну стійкість атмосфери.

Доступна потенціальна енергія (Р) може бути розрахована за формулою, виведеною Е.Н. Лоренцем

$$P = \frac{1}{2} c_p \left[ \frac{\gamma_a \sigma_T^2}{(\gamma_a - \bar{\gamma}) T} \right], \quad (4.5)$$

де  $\gamma_a$  – сухоадіабатичний градієнт;

$\gamma$  – вертикальний градієнт температури;

$\sigma_T^2$  – зважене значення дисперсії температури на ізобаричній поверхні.

Риска зверху в (4.5) позначає осереднення по ізобаричній поверхні.

Для визначення напрямку та процесів, що призводять до перетворення однієї форми енергії на іншу, розглядають зональну (z) і вихрову (e) складові потоку, в якому формуються рухи різних масштабів [130]. Оперування цими компонентами дозволило Е.Н. Лоренцу запропонувати загальну схему енергетичного циклу, згідно з якою цикл зазвичай протікає від зональної доступної потенціальної енергії ( $P_z$ ) через вихрову доступну потенціальну енергію ( $P_e$ ) до вихрової кінетичної енергії ( $K_e$ ), і, нарешті, до зональної кінетичної енергії ( $K_z$ ). Через постійний вплив вихрових збурень, які виникають та еволюціонують у зональному потоці, ( $P_z$ ) постійно перетворюється на вихрову ДПЕ, яка, в свою чергу, частково перетворюється на вихрову кінетичну енергію, а частково може безпосередньо накопичуватися чи розсіюватися в результаті вивільнення прихованого тепла або під впливом вихрового потоку тепла. Зазначена схема у подальших дослідженнях неодноразово модифікувалася і удосконалювалася різними авторами через уточнення рівнянь бюджету різних видів енергій для описання взаємодії зонального потоку та хвильових збурень [132-135].

Поряд з дослідженнями глобального енергетичного циклу, важливий внесок у розуміння енергетичних перетворень в атмосфері вносять роботи з аналізу процесів синоптичного масштабу. Вже в ранніх дослідженнях Е. Пальмена [117] зазначалося, що генерація кінетичної енергії у позатропічному циклоні середнього масштабу складає близько  $18 \cdot 10^{10}$  кВт, тобто достатньо всього 4-5 циклонів середньої інтенсивності, щоб забезпечити увесь запас кінетичної енергії, яка генерується у помірних широтах Північної півкулі. Оскільки тропосферні циклони і антициклони супроводжуються чітко вираженими полями упорядкованих вертикальних

рухів синоптичного масштабу, ці вихрові структури виступають як джерела та стоки кінетичної енергії. Як витікає з поняття ДПЕ, антициклони, в яких переважають низхідні вертикальні рухи, є джерелом кінетичної енергії, а циклони з переважаючими висхідними рухами виступають як області стоку кінетичної енергії. Окрім того, у позатропічних вихорах синоптичного масштабу важливу роль відіграє вивільнення прихованого тепла конденсації в процесі хмароутворення. Хоча цей фактор є значно меншим, ніж у тропічних циклонах, тим не менш, він виступає додатковим джерелом тепла, яке дає внесок у збільшення ДПЕ.

Практичне розв'язання рівнянь балансу різних видів енергії з фізичним трактуванням окремих членів рівнянь для аналізу енергетичних перетворень в окремих баричних утвореннях представляє собою складну чисельну задачу, яка розглядалась у багатьох дослідженнях, в тому числі й авторських [136-138]. В даному розділі представимо результати аналізу енергетичних запасів та деяких видів перетворень різних видів енергії для декількох періодів посух в Україні, розрахунок яких був здійснений за допомогою розробленого в ОДЕКУ програмного комплексу (автор розробки д.геогр.н. В.М. Хохлов).

Були розглянуті енергетичні процеси в атмосфері великого регіону, який в значній мірі охоплює континентальну територію першого природного синоптичного району (I ПСР). Як відомо, саме в таких великих секторах Земної кулі на деяких проміжках часу (звичайно 5-7 діб) можна виділити основні синоптичні процеси, які характеризують певний природно-синоптичний період (ПСП) [87]. Хоча ПСП складають різні синоптичні процеси (циклони і антициклони), що протікають у межах одного ПСР, загальне тропосферне термобаричне поле характеризується зберіганням напрямку основних переносів протягом ПСП, що з енергетичної точки зору може характеризуватися певними запасами енергії і напрямками енергетичних перетворень [139]. Оскільки формування сильних і тривалих посух пов'язано зі значними аномаліями у зональному потоці, зокрема формуванням блокуючих структур, кількісна оцінка енергетичного стану тропосфери у

регіоні буде відбивати процес еволюції блоку. Окрім того, коливання енергетичних характеристик за часом можуть допомогти у кількісному визначенні часових меж ПСП, що звичайно виконується за допомогою індексів циркуляції та синоптичного аналізу карт погоди.

В якості вихідних даних взяті поля метеорологічних величин реаналізу NCEP-NCAR для області, обмеженої координатами  $35-70^\circ$  пн.ш. і  $10-80^\circ$  сх.д. Для розрахунку енергетичних характеристик використані пентадні поля геопотенціальних висот ( $H$ ), складових швидкості вітру ( $u, v$ ), ізобаричної вертикальної швидкості ( $\tau$ ) та температури повітря ( $T$ ) з кроком регулярної сітки  $2,5^\circ$  на 12 рівнях атмосфери з 1000 по 100 гПа.

Були розраховані такі енергетичні характеристики: середньозональна доступна потенціальна енергія  $P_z$ , вихрова доступна потенціальна енергія  $P_e$ , середньозональна кінетична енергія  $K_z$ , вихрова кінетична енергія  $K_e$ , а також перетворення цих енергій ( $K_z - K_e$ ), ( $P_z - P_e$ ), ( $P_z - K_z$ ), ( $P_e - K_e$ ).

Розрахунки запасів енергій та їх перетворень проводилися згідно алгоритму, розробленому для інтегрування енергетичних рівнянь у виділеному об'ємі із застосуванням ізобаричної системи координат [132, 136]. Виділений об'єм атмосфери обмежується широтами  $\varphi_1$  і  $\varphi_2$ , меридіанами  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$ , ізобаричними поверхнями  $p_1$  і  $p_2$  ( $p_1 < p_2$ ).

Середнє значення змінної  $X$  на ізобаричній поверхні  $p = const$  визначається за формулою

$$[X]_{\lambda\varphi} = \frac{1}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1)} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} X \cos \varphi d\lambda d\varphi. \quad (4.6)$$

Для виділення зональної та вихрової компонент будь-якого виду енергії приймається, що вихрова складова параметру  $X$  є відхиленням від його середнього зонального значення

$$(X)_\lambda = X - [X]_\lambda. \quad (4.7)$$

Формули інтегрування по об'єму за гідростатичного припущення для енергетичних характеристик мають наступний вигляд:

$$P_z = \int_{p_1}^{p_2} \frac{[(T)_\lambda]_{\lambda\varphi}^2}{2[\sigma]_{\lambda\varphi}} dp; \quad (4.8)$$

$$P_e = \int_{p_1}^{p_2} \frac{[(T)_\lambda]_{\lambda\varphi}}{2[\sigma]_{\lambda\varphi}} dp; \quad (4.9)$$

$$K_z = \int_{p_1}^{p_2} \frac{[(u)_\lambda^2 + (v)_\lambda^2]_{\lambda\varphi}}{2g} dp; \quad (4.10)$$

$$K_e = \int_{p_1}^{p_2} \frac{[(u)_\lambda^2 + (v)_\lambda^2]_{\lambda\varphi}}{2g} dp, \quad (4.11)$$

де  $T$  – температура повітря;

$u, v$  – зональна та меридіональна складові швидкості вітру.

У формулах (4.8)-(4.11)  $\sigma$  – це параметр статичної стійкості

$$[\sigma]_{\lambda\varphi} = \left[ \frac{gT}{c_p} - \frac{pg}{R} \frac{\partial T}{\partial p} \right]_{\lambda\varphi}, \quad (4.12)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння;

$c_p$  – питома теплоємність повітря за сталого тиску;

$R$  – газова стала для сухого повітря.

Відповідний вираз у (4.8)-(4.11) означає незмінність величини  $X$  вздовж широтного кола

$$([X]_\lambda)_\varphi = [X]_\lambda - [X]_{\lambda\varphi}. \quad (4.13)$$

Математичні вирази для перетворень форм доступної потенціальної енергії та кінетичної енергії, згідно [136], представлені у Додатку К.



Перетворення між формами ДПЕ визначається наявністю збурень у зональному градієнті температури, викликаному меридіональним переміщенням повітряних мас. Перетворення між формами ДПЕ та кінетичної енергії в атмосферних вихорах відбуваються, коли на одній і тій самій широті тепле повітря підіймається, а холодне – опускається. Перетворення форм кінетичної енергії відбувається переважно у верхній тропосфері через наявність зсуву вітру в струминній течії та хвильових збурень у потоці.

Для дослідження були обрані три випадки тривалих сезонних посух в Україні, які ідентифіковані у науковій літературі та цьому дослідженні: весняно-літні посухи 1959, 1968 рр. та осіння посуха 2011 р. Для усіх обраних посух є характерною велика площа охоплення – понад 60% території країни.

### **Посуха 1959 року**

Сильна весняно-літня посуха 1959 р. охопила 62% території країни, при цьому центр посухи спостерігався в областях Лівобережної України – Запорізькій, Харківській, Луганській, Полтавській (див. табл. 4.2). Мінімальні значення ГТК дорівнювали 0,5-0,6.

Розвиток посухи відбувався за наявності блокуючих процесів в атмосфері протягом квітня-червня (рис. 4.20). При цьому спостерігалася міграція центрів блокування від західних районів Європи у квітні через центр України у травні і далі на східні райони у червні. Як можна бачити з рис. 4.20, а, максимальна кількість блоків спостерігалась в межах 55-60° пн.ш., а центр блокувань розташовувався над північними районами України та Білоруссю. Часовий хід індексу ЕСВІ показав (рис. 4.20, б), що тривалі періоди блокування виникали з кінця квітня до середини травня (5 пентад поспіль) та на початку червня (2 пентади поспіль). В інші періоди стан атмосферної циркуляції був близький до норми, а наприкінці травня спостерігалось посилення зональної циркуляції. Таким чином, розвиток посухи у досліджуваній період був обумовлений безпосереднім впливом блокуючих антициклонів (гребенів), що розвивалися над територією України.

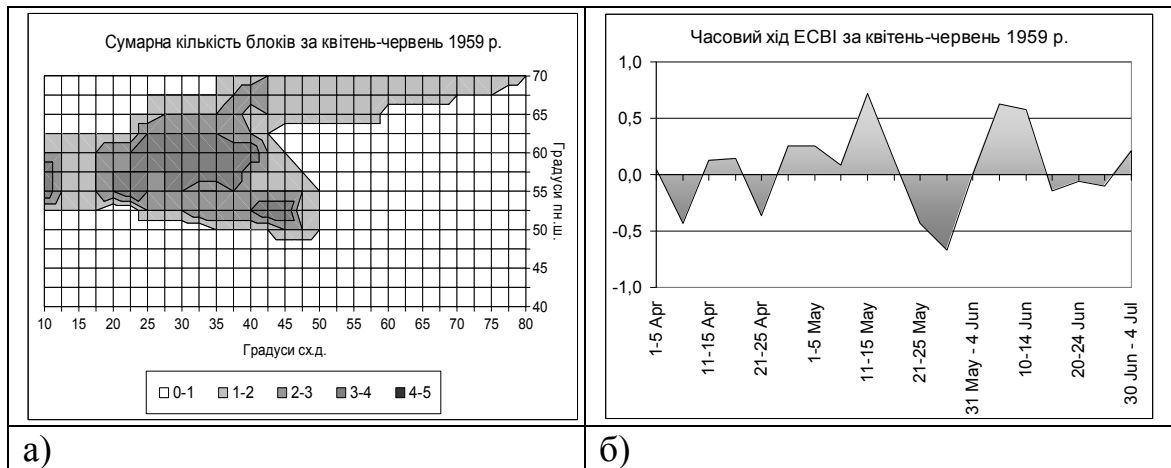


Рис. 4.20. Повторюваність блоків (а) та часовий хід індексу ЕСВІ (б) у квітні-червні 1959 р.

У Додатку Л представлені графіки часового ходу енергетичних характеристик протягом квітня-червня 1959 р., розглянемо їх сумісно з часовим ходом індексу блокування ЕСВІ. Запаси зональної ДПЕ ( $P_z$ ) у різних шарах атмосфери зазнають коливань, протилежних до коливань індексу ЕСВІ (рис. Л.1, а). Мінімальні запаси ( $P_z$ ) ( $10\text{-}15 \cdot 10^5$  Дж·м<sup>-2</sup>) доводилися на фази максимального розвитку блокуючих процесів у першій половині травня та на початку червня. Максимальні запаси ( $P_z$ ) (до  $35 \cdot 10^5$  Дж·м<sup>-2</sup>) фіксувалися у періоди посилення зональної циркуляції, особливо у 4-6 пентадах травня.

Вихрова ДПЕ ( $P_e$ ) зазнає більш високочастотних коливань (рис. Л.1, б), при цьому піки максимальних інтегральних запасів енергії (до  $10 \cdot 10^5$  Дж·м<sup>-2</sup>) відповідають як мінімальним, так й максимальним значенням індексу ЕСВІ, що свідчить про розвиток синоптичних вихорів як блокуючого характеру, так й рухомих в умовах зонального стану потоку. У періоди блокування спостерігалось зростання запасів  $P_e$ .

Зональна кінетична енергія ( $K_z$ ), як й ( $P_z$ ), має протифазні з індексом ЕСВІ коливання інтегральних значень та у верхній половині тропосфери (рис. Л.1, в). В нижньому шарі (850-700 гПа) максимальні запаси  $K_z$  (до  $18 \cdot 10^5$  Дж·м<sup>-2</sup>) фіксуються за позитивних та негативних екстремумах індексу блокування, що свідчить про посилення циркуляції атмосфери в ці періоди

(зональної або меридіональної). І навпаки, зниження запасів  $K_z$  відбувається при наближенні стану повітряного потоку до кліматичного.

Нарешті, інтегральні запаси вихрової кінетичної енергії ( $K_e$ ) мають тенденцію збільшуватися і досягати максимуму (до  $7 \cdot 10^5$  Дж·м<sup>-2</sup>) напередодні максимумів блокування (у травні та червні), що свідчить про інтенсивний розвиток антициклону (гребеня) в усіх шарах тропосфери (рис. Л.1, г). Зменшення запасів  $K_e$  відбувалося, загалом, у періоди посилення зональної циркуляції, але не завжди досягало мінімуму, адже в ці періоди можливий розвиток рухомих баричних утворень.

Перетворення різних видів енергії протягом квітня-червня 1959 р. представлено на рис. Л.2 для двох шарів тропосфери: 1000-500 та 500-200 гПа. Протягом періоду, що розглядається, перетворення зональної доступної потенціальної енергії та вихрової ДПЕ ( $P_z - P_e$ ) мало складний характер, але головним екстремумам індексу блокування відповідали й енергетичні екстремуми (рис. Л.2, а). Так, під час двох основних періодів блокування у травні та червні, а також напередодні короткого періоду у квітні спостерігався перехід зональної ДПЕ у вихрову ДПЕ, при цьому в нижньому шарі процес був більш інтенсивний (до 2,5-3 Вт·м<sup>-2</sup>). В періоди посилення зональної циркуляції такий енергетичний перехід значно слабшає і навіть стає зворотним, як наприкінці травня.

Перетворення зональної доступної потенціальної енергії і зональної кінетичної енергії ( $P_z - K_z$ ) зазнавало коливань, які пов'язані з розвитком основних блокуючих процесів (рис. Л.2, б). Перед початком головного епізоду блокування у травні протягом двох пентад спостерігався процес перетворення ДПЕ зонального потоку на зональну кінетичну енергію, інтенсивність якого досягала 2 Вт·м<sup>-2</sup> у нижньому шарі. Другий епізод блокування у червні не мав такого екстремуму в перетворенні. Періоди посилення зонального перенесення супроводжувалися зворотнім переходом енергії від зональної кінетичної у ДПЕ зонального потоку.

Перетворення вихрової доступної потенціальної енергії у вихрову кінетичну енергію ( $P_e-K_e$ ) має складний характер через постійне утворення вихрових збурень синоптичного масштабу на площі досліджуваного регіону (рис. Л.2, в). При цьому, в обох шарах тропосфери протягом всього періоду переважав перехід від вихрової ДПЕ у вихрову кінетичну енергію, а максимальна інтенсивність цього процесу припала на основний епізод блокування в травні (до  $2,5 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$  в нижньому шарі). Зворотній перехід спостерігався в окремі пентади, найбільш інтенсивний відмічений наприкінці травня в період посилення зональної циркуляції, коли над Європою спостерігався розвиток рухомих циклонічних утворень.

Перетворення форм кінетичної енергії ( $K_z-K_e$ ) протікало по-різному у верхньому та нижньому шарі атмосфери та мало різну інтенсивність (рис. Л.2, г). Частота коливань перетворень вища за індекс блокування, тому не спостерігається чіткої відповідності енергетичних процесів фазам блокування. Під час трьох епізодів блокування або напередодні переважало перетворення зональної кінетичної енергії на вихрову.

### **Посуха 1968 року**

У квітні-червні 1968 року сильна посуха охопила 67% території країни, при цьому центр посухи знаходився у Запорізькій, Херсонській та Дніпропетровській областях, де мінімальні значення ГТК склали 0,2-0,3 (див. табл. 4.2). Ця посуха не була катастрофічною для сільського господарства через великі запаси вологи, які накопичилися у ґрунті протягом зимового періоду. Як зазначається у [140], погодні умови в Україні протягом весни та на початку літа були обумовлені або відрогами зі сходу, або периферійними частинами антициклонів над ЄТР, які пересувалися з північного заходу. Активний циклогенез спостерігався лише у другій декаді травня. У квітні та травні кількість опадів по країні була невеликою, а температура часто перевищувала норму, особливо у травні. У червні кількість опадів в окремих районах центральних та південних областей склала 10-25% від норми, а на решті території не перевищувала 70%.

В усіх трьох місяцях спостерігалось по два центри блокування (див. табл. 4.2): у квітні – на заході країни та в районі південного Уралу, у травні та червні – безпосередньо над територією країни та над Західною Європою. Як можна бачити на рис. 4.21, а, центри найбільшої повторюваності блоків розташовувалися в зональній смузі між 50-55° пн.ш., при цьому основний центр знаходився над Україною.

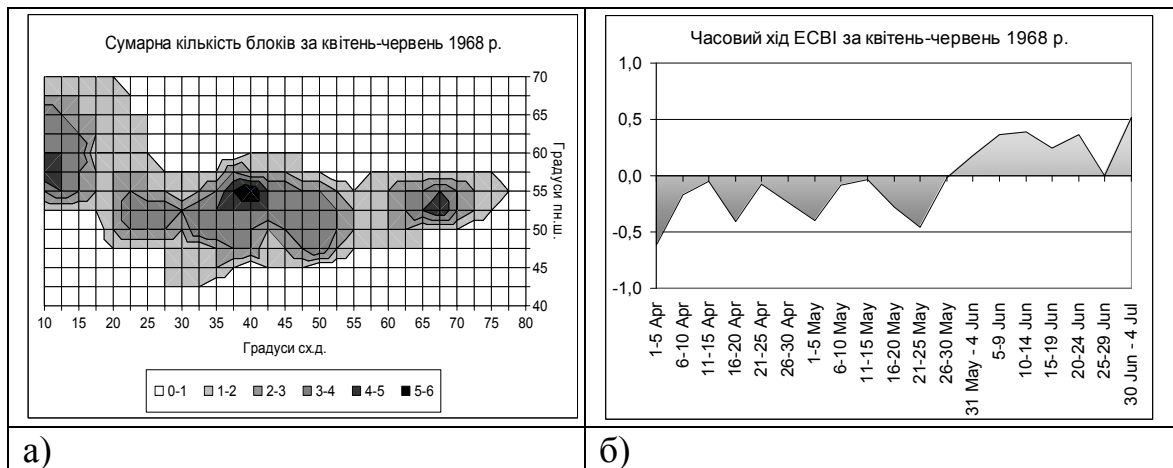


Рис. 4.21. Повторюваність блоків (а) та часовий хід індексу ЕСВІ (б) у квітні-червні 1968 р.

Часовий хід індексу ЕСВІ показав (рис. 4.21, б), що протягом квітня-травня переважав зональний переніс в атмосфері, який періодично посилювався, що не виключає переміщення рухомих антициклонічних утворень західного типу. Але з початку червня встановився меридіональний характер циркуляції, який супроводжувався блокуючим процесом протягом всього місяця.

В Додатку М представлені результати щодо розрахунку енергетичних характеристик для весняно-літньої посухи 1968 року.

Часовий хід доступної потенціальної енергії зонального потоку зазнавав періодичних коливань у зв'язку з синоптичними процесами, причому на протязі трьох місяців відбувалося поступове зниження запасів  $P_z$  в усіх шарах тропосфери (рис. М.1, а). Під час блокування (ЕСВІ > 0) спостерігалось зменшення запасів зональної ДПЕ, в умовах посилення зонального переносу,

навпаки, запаси  $P_z$  збільшувалися. Найбільші інтегральні запаси зональної ДПЕ (майже  $40 \cdot 10^5$  Дж·м<sup>-2</sup>) спостерігалися у середині квітня, а найменші значення (до  $11 \cdot 10^5$  Дж·м<sup>-2</sup>) відмічені в період блокування у червні.

Коливання вихрової ДПЕ відбувалися незалежно від ходу індексу блокування (рис. М.1, б). Найбільші інтегральні та пошарові запаси  $P_e$  (до  $11 \cdot 10^5$  Дж·м<sup>-2</sup>) спостерігалися у квітні за умови посилення зонального перенесення в атмосфері регіону, коли спостерігалось переміщення рухомих циклонів та антициклонів з західною та північно-західною складовою. Блокуючий процес у червні супроводжувався загальним зниженням вихрової ДПЕ, що свідчить про досить невеликі градієнти тиску в антициклонічних утвореннях у цей період.

Запаси зональної кінетичної енергії мали максимальні значення на початку періоду, що розглядається, та досягали інтегрально  $18 \cdot 10^5$  Дж·м<sup>-2</sup> у квітні (рис. М.1, в). У травні зафіксований мінімум запасів  $K_z$ , а в період блокування у червні спостерігалось поступове збільшення зональної кінетичної енергії до фази максимальної інтенсивності блокування, коли висотний антициклон досяг найбільшого розвитку.

Вихрова кінетична енергія зазнавала часті коливання у зв'язку з вихроутворенням в регіоні дослідження (рис. М.1, г). Як й для інших видів енергії, запаси  $K_e$  були максимальними у квітні ( $9 \cdot 10^5$  Дж·м<sup>-2</sup>), знизилися у травні, та знов збільшилися у червні під час блокування. Хоча чіткої відповідності коливань  $K_e$  до індексу блокування не спостерігається, можна зазначити, що при зменшенні індексу запаси енергії звичайно зростали, на максимумах індексу ЕСВІ, навпаки, зменшувалися.

Найактивніші перетворення зональної і вихрової ДПЕ ( $P_z - P_e$ ) відбувалися в нижній половині атмосфери (до  $3-4$  Вт·м<sup>-2</sup>), при цьому максимумами енергетичних перетворень доводилися на періоди мінімумів індексу блокування, і навпаки (рис. М.2, а). У червні, при встановленні блокуючого процесу, інтенсивність перетворення ( $P_z - P_e$ ), в цілому, зменшилася порівняно з фазою зонального потоку, і лише при послабленні

блокування у середині червня, коли відбулося руйнування старого антициклону над Скандинавією і його регенерація за рахунок вторгнення арктичного ядра, інтенсивність енергетичного перетворення зростає.

Процес перетворення зональної ДПЕ на зональну кінетичну енергію мав один чіткий максимум у період, що розглядається (рис. М.2, б). Перед початком стійкого процесу червневого блокування в останній декаді травня спостерігався максимум енергетичного перетворення ( $P_z-K_z$ ) в обох шарах тропосфери, інтенсивність якого досягла  $2-3 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ . Після цього, у міру посилення блокуючого процесу, інтенсивність перетворення зменшувалася та змінилася на протилежний знак у другій пентаді червня. В періоди посиленого зонального потоку в атмосфері відмічався різний за знаком характер перетворень ( $P_z-K_z$ ) у верхній та нижній половині тропосфери, що свідчить про наявність низьких рухомих баричних утворень, які не збурювали верхні шари. В період блокування, за умови розвитку антициклону в усій товщі тропосфери знак енергетичних перетворень був однаковий в обох шарах.

Перетворення вихрової ДПЕ на вихрову кінетичну енергію в період посиленого зонального перенесення у квітні та травні було прямим у верхній половині тропосфери та знаковим у нижньому шарі (рис. М.2, в). Найбільші значення ( $P_e-K_e$ ) відмічалися на початку квітня – понад  $1,5-2 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$  в різних шарах. У другій половині квітня перетворення вихрової енергії відбувалося протилежно у верхній та нижній тропосфері, а вже з кінця травня процес перетворення відбувався з майже однаковою інтенсивністю в обох шарах. Під час блокування інтенсивність перетворення була найнижчою в усьому досліджуваному періоді, при цьому переважав перехід вихрової ДПЕ у вихрову кінетичну енергію.

Перехід кінетичної енергії ( $K_z-K_e$ ) в умовах посиленої зональної течії у квітні-травні відбувався від вихрових збурень до зональної течії, при цьому більша мінливість та інтенсивність перетворень (до  $-11 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ ) спостерігалася у верхньому шарі тропосфери (рис. М.2, г). В нижній тропосфері

інтенсивність перетворень була близькою до нуля майже весь досліджуваний період. Процесу блокування передувала зміна напрямку перетворень, і під час блокування у червні відбувалася передача кінетичної енергії від зональної течії до вихрових збурень.

### **Осінь посуха 2011 року**

Як вже описано вище (п. 4.3.3), осінь посуха 2011 р. була досить аномальною завдяки антициклонічним процесам, які протягом трьох місяців постійно циркулювали над територією України. Якщо у вересні та першій половині жовтня переважали рухомі антициклони західного типу, то з середини жовтня процес набув стаціонарного характеру завдяки перебудові висотного баричного поля і розвитку блокуючого гребеня на півночі Європи. Головний епізод блокування почався у середині жовтня та тривав до кінця листопада, досягнувши максимуму 7-11 листопада 2011 р. (див. рис. 4.18, б)

Часовий хід запасів зональної ДПЕ показав, що протягом вересня-жовтня відбувалося їх поступове зменшення у міру зростання інтенсивності блокуючого процесу (рис. Н.1, а). Якщо на початку вересня в умовах зонального типу циркуляції інтегральні запаси  $P_z$  досягали  $22-23 \cdot 10^5$  Дж·м<sup>-2</sup>, то в листопаді у пік блокування вони зменшилися до  $6,5 \cdot 10^5$  Дж·м<sup>-2</sup>. Взагалі, навіть нетривалі періоди зменшення індексу ЕСВІ супроводжувалися одночасним зростанням запасів  $P_z$ .

Коливання запасів вихрової ДПЕ мали узгодженість з коливаннями індексу блокування. Як можна бачити (рис. Н.1, б), всі екстремуми ЕСВІ супроводжуються відповідними екстремумами запасів  $P_e$ . При цьому спостерігалось поступове зростання цього виду енергії з вересня до листопаду, коли в період максимуму блокування настав інтегральний максимум вихрової ДПЕ – майже  $16 \cdot 10^5$  Дж·м<sup>-2</sup>. Тобто, блокуючий антициклон досяг великих просторових розмірів, зумовивши енергетичний баланс всього регіону.

Запаси зональної кінетичної енергії коливаються, загалом, у протифазі до індексу блокування (рис. Н.1, в). При посиленні зонального перенесення



або послабленні блокуючого процесу інтегральні запаси  $K_z$  збільшувалися до  $13-18 \cdot 10^5$  Дж·м<sup>-2</sup> в різні періоди. У пік блокування в листопаді запаси  $K_z$  зменшилися, адже кінетична енергія пішла на підтримку вихреутворення у всій товщі тропосфери.

Часовий хід запасів вихрової кінетичної енергії відповідає екстремумам блокування у зв'язку з посиленням антициклонічної циркуляції в ці періоди (рис. Н.1, г), але можна відмітити й додаткові максимуми, пов'язані з циклонічними полями (наприклад, вихід південного циклону 9-10 жовтня та проходження глибокої улоговини з фронтом 15-18 листопада). Запаси  $K_e$  є найбільш мінливою характеристикою через постійно збурений стан атмосфери вихровими утвореннями. Максимальні інтегральні значення  $K_e$  у досліджуваній період склали  $11-12 \cdot 10^5$  Дж·м<sup>-2</sup>.

Перетворення зональної ДПЕ на вихрову ( $P_z-P_e$ ) відбувалося з більшою інтенсивністю у нижній половині тропосфери майже протягом усього періоду як при посиленому зональному перенесенні, так й в умовах блокування атмосфери, що пов'язано з постійним формуванням атмосферних вихорів, переважно антициклонів (рис. Н.2, а). Зворотній перехід відбувався протягом двох періодів – наприкінці вересня та у середині листопада. Обидві ситуації характеризувалися послабленням блокування після або під час зміни знаку енергетичних перетворень.

Майже протягом всього періоду спостерігалось зворотне перетворення зональної ДПЕ та зональної кінетичної енергії ( $P_z-K_z$ ) в усій тропосфері (рис. Н.2, б). Тобто, ДПЕ зонального потоку поповнювалася за рахунок рухомих вихрових збурень. Додатні значення ( $P_z-K_z$ ) відмічалися напередодні максимумів блокування, що свідчить про підтримку потужного антициклогенезу в тропосфері за рахунок ДПЕ зонального потоку.

Перетворення вихрової ДПЕ та вихрової кінетичної енергії ( $P_e-K_e$ ) відбувалося переважно у протифазі до індексу ЕСВІ (рис. Н.2, в). Основний епізод блокування з кінця жовтня до середини листопада характеризувався переходом вихрової кінетичної енергії до вихрової ДПЕ, особливо

інтенсивним процес був у нижній половині тропосфери (до  $-4 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ ). В умовах зонального потоку спостерігався слабкий перехід вихрової ДПЕ до вихрової кінетичної енергії синоптичних збурень.

Перетворення кінетичної енергії зонального потоку на вихрову кінетичну енергію ( $K_z$ - $K_e$ ) мало складний характер, але в цілому, відповідало процесам блокування в досліджуваний період (рис. Н.2, г). У нижній половині тропосфери інтенсивність та амплітуда перетворень була невеликою порівняно з шаром 500-200 гПа, та слабо реагувала на хід індексу блокування. У верхньому шарі тропосфери інтенсивність переходу кінетичної енергії зонального потоку в кінетичну вихрову енергію зростала під час епізодів блокування (максимум до  $12-13 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ ), та зменшувалася при послабленні блокування, що свідчить про підтримку антициклонічних вихорів кінетичною енергією від основного потоку. В умовах зонального стану атмосфери в деякі періоди мав місце зворотній перехід від  $K_e$  до  $K_z$ , особливо в нижній половині тропосфери.

Узагальнимо особливості енергетичних характеристик розглянутих періодів з посухами в Україні, які супроводжувалися блокуючими процесами в атмосфері.

1. Запаси доступної потенціальної енергії зонального потоку ( $P_z$ ) мають найвищі значення в умовах посиленого зонального потоку ( $ЕСВІ < 0$ ) та найнижчі показники в періоди блокування атмосфери ( $ЕСВІ > 0$ ).

2. Запаси вихрової доступної потенціальної енергії ( $P_e$ ) мають більш високу частоту коливань, ніж індекс блокування, через тісний зв'язок з еволюцією рухомих синоптичних вихорів. Загалом, в період блокування відбувається деяке зростання  $P_e$ , але й в умовах посиленого зонального потоку також відмічалися максимальні запаси енергії.

3. Інтегральні запаси зональної кінетичної енергії  $K_z$ , загалом, коливаються у протифазі до індексу блокування  $ЕСВІ$ . При посиленні зонального перенесення в атмосфері спостерігаються максимальні значення  $K_z$ , при послабленні зональної течії та формуванні блокуючого процесу

інтегральні запаси  $K_z$  зменшуються. Слід зазначити, що наприкінці тривалих періодів блокувань запаси  $K_z$  починають збільшуватися, що може виступати ознакою наближення закінчення блокуючого процесу.

4. Вихрова кінетична енергія ( $K_e$ ) є найбільш мінливою енергетичною характеристикою серед розглянутих через прямий зв'язок з розвитком вихрових збурень. Максимуми запасів  $K_e$  спостерігаються як в умовах посиленого зонального потоку при утворенні рухомих вихорів, так й в періоди блокувань при розвитку антициклонічних вихорів по вертикалі.

5. Перетворення зональної доступної потенціальної енергії на вихрову ДПЕ ( $P_z-P_e$ ) протікає з найбільшою інтенсивністю в нижній половині тропосфери (шар 1000-500 гПа). В періоди блокування, загалом спостерігається інтегральний перехід від  $P_z$  до  $P_e$ . Але у зональному потоці також можливі максимуми прямого перетворення в періоди утворення рухомих антициклонічних вихорів.

6. Перетворення зональної доступної потенціальної енергії і зональної кінетичної енергії ( $P_z-K_z$ ) зазнає частих коливань за напрямом переходу енергій та може бути протилежним у верхній і нижній тропосфері. В усіх випадках в період, що передував максимальній інтенсивності блокування атмосфери, спостерігався перехід зональної ДПЕ у зональну кінетичну енергію. В умовах посиленого зонального перенесення, як правило, переважає зворотній перехід, від  $K_z$  до  $P_z$ .

7. Перетворення вихрової доступної потенціальної енергії та вихрової кінетичної енергії ( $P_e-K_e$ ) носить складний характер та відрізняється по розглянутих випадках через різну еволюцію атмосферних вихорів, що утворювалися. В усіх випадках в умовах стійкої зональної циркуляції переважає перехід вихрової ДПЕ у вихрову кінетичну енергію. При виникненні блокуючого процесу у двох випадках зберігався зазначений знак перетворення, а в одному (2011 р.) він змінився на протилежний, тобто кінетична енергія вихору передавалася зональному потоку. Ці відмінності

можуть пояснюватися значним масштабом блокуючого антициклону в 2011 р. відносно області розрахунку енергетичних характеристик.

Згідно дослідженню енергетики та вологовмісту блокуючих антициклонів (гребенів) та їх взаємодії з оточенням, представленому в [141, 142], перехід вихрової кінетичної енергії ( $K_e$ ) у вихрову ДПЕ ( $P_e$ ) відбувається в добре розвинутих по вертикалі та горизонталі антициклонах з квазівертикальною віссю, а зворотній перехід є характерним для гребневих структур у тропосфері. Отже, можна вважати, що блокуючий антициклон восени 2011 р. був найбільш потужним з розглянутих випадків.

8. Інтенсивність перетворення зональної кінетичної енергії та вихрової кінетичної енергії ( $K_z$ - $K_e$ ) суттєво вище у верхній половині тропосфери (шар 500-200 гПа), ніж у нижньому шарі. В усіх випадках в період блокування спостерігався перехід кінетичної енергії від зонального потоку до вихорів, при цьому інтенсивність цього перетворення звичайно зростала при посиленні процесу блокування. В умовах стійкої зональної циркуляції атмосфери відбувався зворотній перехід від  $K_e$  до  $K_z$ .

#### Висновки до розділу 4

Коливання регіональної циркуляції атмосфери проявляються на різних проміжках часу завдяки впливу періодичних процесів у загальній циркуляції атмосфери. На прикладі квазідворічного коливання (КДК) зонального вітру в екваторіальній атмосфері показано, що динаміка посух і урожайності сільськогосподарських культур в Україні пов'язана в значній мірі з фазами цього коливання. У східну фазу КДК кількість посух на 9-16% більше, ніж у західну, і як наслідок, втрати врожаю на 15-19% перевищують відповідні показники у протилежну фазу.

Синоптичні умови формування сильних та тривалих посух у вегетаційний період в Україні характеризуються, зазвичай, наявністю стаціонарних або блокуючих антициклонічних процесів в тропосфері Східної

Європи. Виконана оцінка внеску блокуючих ситуацій у формування посушливих періодів показала, що в атмосфері Атлантико-Європейського регіону спостерігається до двох центрів блокування, принаймні один з яких розташовується у межах території України, решта – на схід або захід від неї. Найбільш ймовірна структура місячного висотного баричного поля при цьому містить елементи розщеплення зонального потоку і „блок” над Україною. Аналіз часового ходу запропонованого Європейського континентального індексу блокування (ЕСВІ) показав, що для формування стійкого, поширеного осередку посухи процес блокування зональної течії повинен тривати не менш 4-х пентад протягом місяця.

Враховуючи важливість вологозапасів ґрунту, які формуються завдяки активній циклонічній діяльності напередодні вегетаційного періоду, показано, що зниження повторюваності циклонічних утворень над територією України у зимовий період супроводжувалося збільшенням посушливості наступних вегетаційних сезонів протягом останнього десятиліття.

Наявність блокування суттєво відбивається у характері енергетичних перетворень в атмосфері Атлантико-Європейського сектору. Показано, що під час блокування зростали запаси зональної і вихрової кінетичної енергії, та зменшувалися запаси зональної і вихрової ДПЕ. При цьому, динаміка вихрових компонентів ДПЕ та кінетичної енергії тісно пов'язана з еволюцією рухомих вихорів синоптичного масштабу, а середньозональні компоненти обох видів енергії добре відбивають життєвий цикл блокуючих систем.

## РОЗДІЛ 5

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ  
КУЛЬТУР В УМОВАХ ВПЛИВУ ПОСУХ5.1. Використання вегетаційного індексу NDVI для моніторингу посух  
в Україні

Сучасний рівень супутникового зондування атмосфери та поверхні Землі дозволяє визначити певні закономірності у взаємодії електромагнітного випромінювання з рослинним покривом, які виражаються цілою низкою параметрів – так званих вегетаційних індексів [143-145].

В даному дослідженні використаний нормалізований диференційний вегетаційний індекс NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), який одержується за допомогою супутникового зондування та відповідає різному ступеню стану рослинного покриву (його площі, щільності та відбивній здатності).

Поняття індексу NDVI базується на тому факті, що здорова рослинність загалом має низьку відбивну здатність видимої частини електромагнітного спектру завдяки абсорбції рослинними пігментами, головним чином хлорофілом. Одночасно, зелене листя має високу відбивну здатність у ближньому інфрачервоному спектрі. Цей індекс уведений в роботі Роуз та ін. [146] і визначається як різниця значень інтенсивності відбитого випромінювання в червоному  $R_R$  (0,62-0,69 мкм) та  $R_{NIR}$  (0,75-0,9 мкм) діапазонах зондування, нормована на суму цих величин

$$NDVI = \frac{R_R - R_{NIR}}{R_R + R_{NIR}}. \quad (5.1)$$

Значення індексу пропорційно загальній зеленій фітомасі і звичайно коливається у межах 0,20-0,80. Як зазначається в дослідженнях з використанням NDVI, наприклад в [143], стан рослинності можна визначити згідно наступних критеріїв:

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, як зазначено в [10, 147], обмежувати застосування тими регіонами і/або часовими інтервалами, де вологозабезпеченість є головним фактором, що обумовлює приріст рослинності.

Мінливість нормалізованого вегетаційного індексу може бути оцінена за допомогою індексу умов вегетації VCI (Vegetation Condition Index), уведеного Ф. Коганом [148]

$$VCI = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \cdot 100\%, \quad (5.2)$$

де NDVI – поточне декадне значення нормалізованого вегетаційного індексу;

$NDVI_{\max}$ ,  $NDVI_{\min}$  – абсолютний міжрічний максимум та мінімум нормалізованого вегетаційного індексу за ту саму декаду.

Умови вегетації представляються індексом VCI у відсотках. Високі значення VCI відповідають сприятливим умовам вегетації, низькі – несприятливим. Значення VCI, близьке до 50%, відображує середні умови

для рослинності, значення між 50 та 100% вказують на оптимальні умови вегетації. Значення VCI, менші за 50%, відображують посушливі умови різного ступеню суворості. Ф. Коган ідентифікував настання посухи, якщо індекс VCI опускається до 35% та нижче. При цьому зазначалося, що дослідження певної території дозволяє виділити категорії інтенсивності посух згідно значень VCI в межах 0-35%. Низькі значення VCI протягом декількох послідовних часових інтервалів показують розвиток посухи. Значення VCI, близькі до 0%, відображують екстремально посушливий період, в якому значення NDVI близькі до свого міжрічного мінімуму. Переваги цього індексу перш за все в тому, що він відображує не просто стан рослинності чи підстильного покриву, як NDVI, а саме такий стан, що склався завдяки поточним метеорологічним умовам. Тому індекс VCI з успіхом використовується для моніторингу посух на різних територіях Земної кулі [149-151].

Для оцінки посушливих умов на території України за допомогою продуктів супутникового зондування та для подальшого використання їх у моделюванні урожайності зернових культур скористуємося вихідною інформацією з бази даних MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), яка надається Проектом глобального сільськогосподарського моніторингу GLAM (Global Agriculture Monitoring Project, <http://deleon.edc.usda.gov>). Цей проект створений при співробітництві Департаменту США з сільського господарства та Національної адміністрації по аеронавтиці і дослідженню космосу (NASA). Створений цими організаціями сервіс об'єднує новий проект NASA з асиміляції даних і продуктів MODIS в існуючу систему підтримки, яка координується зовнішнім сільськогосподарським сервісом (FAS). Інтеграція системи швидкого відклику MODIS (Rapid Response) в моніторингову систему FAS дозволяє підвищити якість моніторингу впливу на сільськогосподарську продукцію таких небезпечних явищ, як посухи, великомасштабні повені та снігові шторми. Система швидкого відклику MODIS забезпечує мобільний доступ до



бази даних MODIS двічі на день: від супутника Terra вранці (10:30) та супутника Aqua після полудня (14:30). Глобальні дані MODIS доступні у трьох резолюціях – 250, 500 та 1000 м, в різних комбінаціях діапазонів зондування.

Просторово-часова глобальна база даних нормалізованого диференційного вегетаційного індексу NDVI, а також нормалізованого диференційного водного індексу NDWI, з просторовим розділенням 250 м компонується з використанням 8 або 16-денних періодів, що дозволяє дослідити міжрічну динаміку індексу у вегетаційний період. Дані MODIS/NDVI автоматично корегуються та комплектуються під регіони, що представляються для використання в FAS. Для безпосереднього аналізу дані доступні через потужний веб-інтерфейс та інструменти аналізу (<http://pekko.geog.umd.edu/usda/beta>). Через інтерфейс можливо вибирати дані для адміністративних регіонів та застосовувати різні маски для побудови полів і графіків часового ходу індексів та їх аномалій.

В цьому дослідженні використані дані NDVI і NDWI по території України в цілому та для окремих областей за період 2000-2013 рр.

Розглянемо розподіл нормалізованого вегетаційного індексу по території України протягом вегетаційного сезону [152]. На рис. 5.1 представлені щомісячні осереднені дані NDVI по областях, згруповані по агрокліматичних зонах. Як можна бачити, по всіх областях спостерігається чіткий сезонний хід NDVI, в якому, починаючи з березня, відбувається швидке наростання значень вегетаційного індексу, яке уповільнюється в травні, а в червні в більшості областей, за виключенням південного Степу, спостерігається максимум NDVI. В південному Степу максимальні значення індексу майже в усіх областях наступають в травні, і лише в Запорізькій області – в червні. Починаючи з липня, значення NDVI поступово зменшуються впродовж другої половини вегетаційного сезону. Швидкість убування вища в південних областях і менша в західних та північних областях України. Найвищі показники NDVI фіксуються в західній Лісостеповій зоні, в

Карпатському регіоні, де середньомісячні значення досягають 0,80-0,82 (рис. 5.1, д).

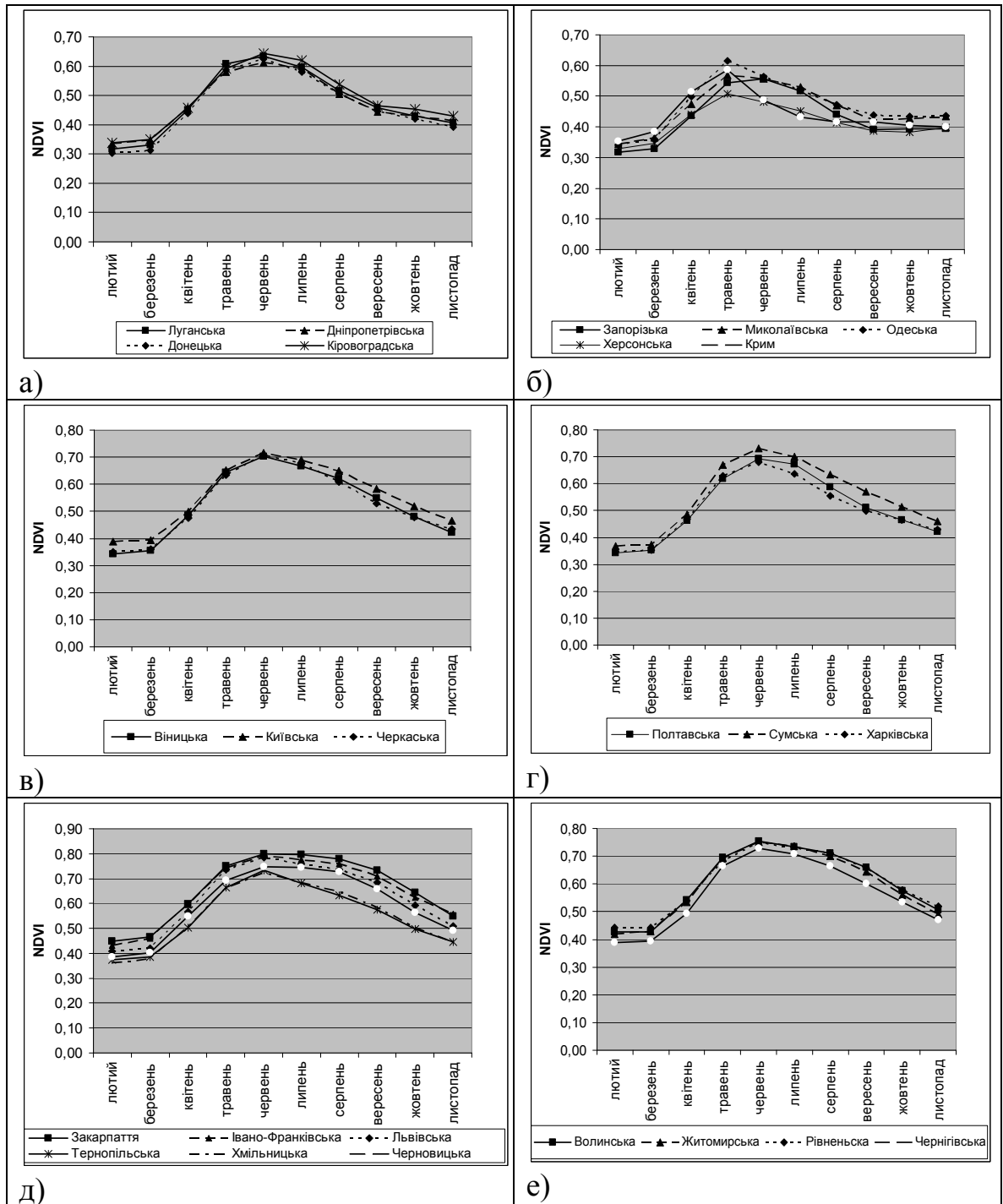


Рис. 5.1. Осереднений по областях України сезонний розподіл NDVI: а) північний Степ; б) південний Степ; в) центральний Лісостеп; г) східний Лісостеп; д) західний Лісостеп; е) Полісся

Також високі середньомісячні значення NDVI (0,75-0,77) спостерігаються в північних областях (рис. 5.1, е). На південь амплітуда

сезонних коливань NDVI та їх максимальні значення зменшуються. Найнижчий сезонний максимум вегетаційного індексу по Україні спостерігається в Херсонській області і становить в травні 0,51 (рис. 5.1, б), при цьому тут фіксується й найменша амплітуда коливання NDVI, що характеризує даний регіон як найбільш посушливий на території країни. Взагалі, найнижчі значення NDVI відмічаються на початку вегетаційного періоду, в березні, і становлять 0,30-0,40 в Степу та Лісостепу і 0,40-0,45 в Карпатському регіоні та Поліссі. На початку осені в південному Степу показники NDVI припиняють суттєво зменшуватися вже в вересні та на протязі трьох осінніх місяців майже не змінюються, коливаючись в межах 0,38-0,43. В інших зонах NDVI убуває протягом всієї осені, продовжуючи тенденцію другої половини літа.

Надалі розглянемо результати розрахунку індексу умов вегетації VCI для агрокліматичних зон України з метою виявлення періодів з посухами. Даний індекс розрахований за формулою (5.2), але використовувалися не декадні, а місячні значення нормалізованого вегетаційного індексу по адміністративним областям, осереднені з ряду тижневих значень NDVI. Максимальні і мінімальні значення NDVI були обрані для кожного місяця окремо з ряду даних за 2000-2013 рр.

Просторово-часовий розподіл індексу VCI представлений для агрокліматичних зон на рис. 5.2. В Степовій зоні (південній та північній) виділяється весняна посуха 2003 р., яка тривала з березня по червень, при цьому найнижчі значення VCI (0%) доводяться на квітень-травень, що вказує на екстремальну посуху (рис. 5.2, а, б). Посушливими були також березень-квітень 2006, 2011 та 2012 рр. У літній період (червень-серпень) найбільш інтенсивною була посуха 2007 р., коли в південному Степу значення VCI дорівнювали 0%, а в північному Степу коливалися в межах 5-17%. Посушливим було літо 2009 р., при цьому посуха тривала й вересні, коли досягла найбільшої інтенсивності зі значенням VCI = 4-9%.

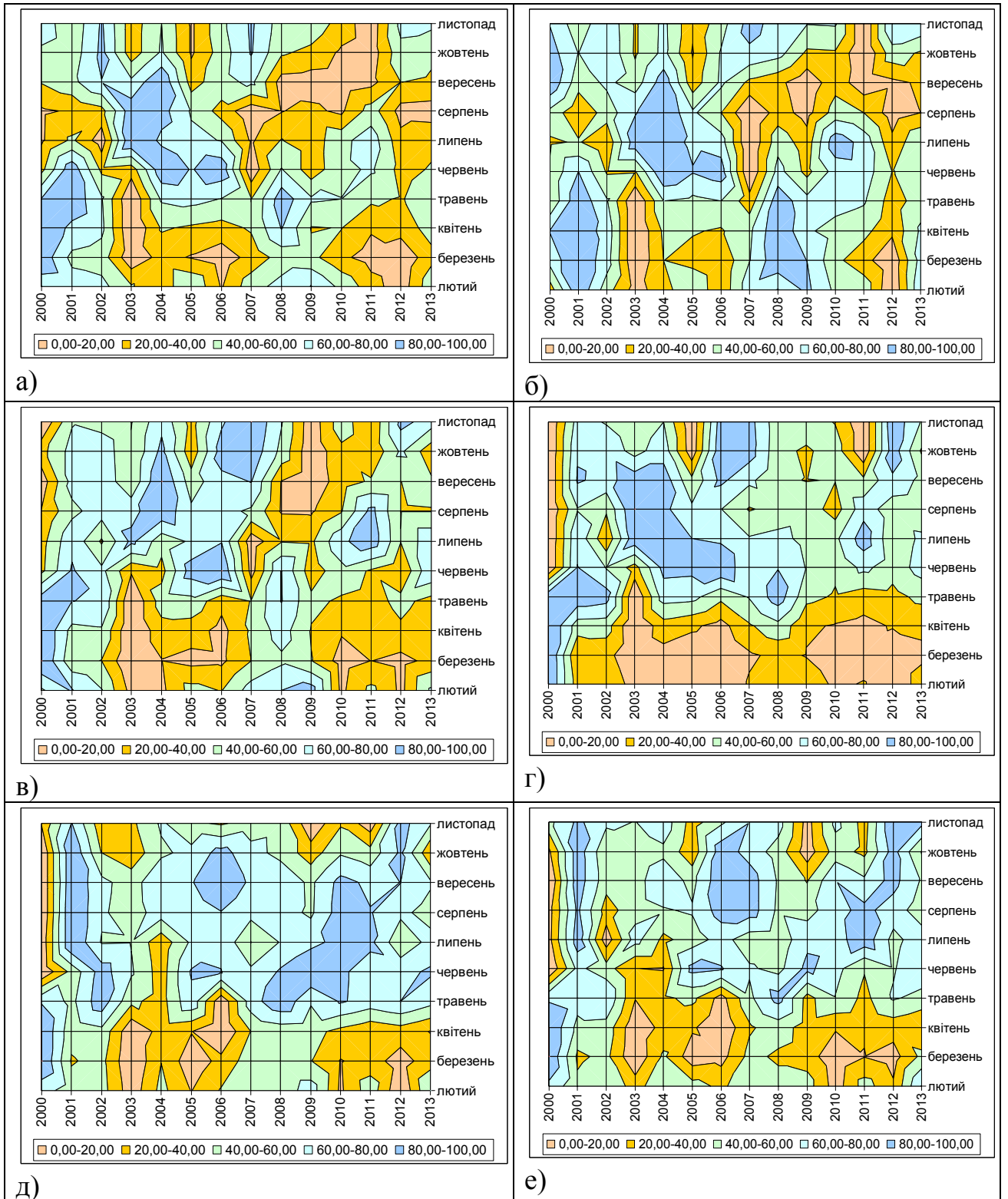


Рис. 5.2. Просторово-часовий розподіл індексу VCI по агрокліматичних зонах України: а) північний Степ; б) південний Степ; в) центральний Лісостеп; г) східний Лісостеп; д) західний Лісостеп; е) Полісся

Посуха спостерігалася також влітку 2012 р. та була продовженням весняної посухи з деяким послабленням у травні-червні. Восени найбільш інтенсивною була посуха 2011 р., коли впродовж трьох місяців в південному Степу значення VCI коливалися в межах 0-5%, в північному Степу – від 6 до 14%.

В центральному Лісостепу виділяються два періоди з весняними посухами: з 2003 по 2006 рр. та з 2010 по 2013 рр. (рис. 5.2, в). Особливо інтенсивною була посуха у 2003 р., коли протягом березня-червня значення VCI було менше за 30%, а у квітні-травні склало 0%. В період 2010-2013 рр. найбільш посушливими навесні були березень та квітень з показниками VCI в межах 11-25%. Влітку найбільш інтенсивною, але відносно нетривалою була посуха у 2007 р., коли у червні-липні значення VCI не перевищило 13%. З 2008 по 2010 роки спостерігалися літньо-осінні посухи (серпень-жовтень), найбільш інтенсивною була посуха 2009 р., коли значення VCI коливалося протягом трьох місяців у межах 4-17%, а найбільш посушливими видалися осінні місяці.

Основною особливістю розподілу VCI в східному Лісостепу є посушливі весняні місяці протягом майже всього досліджуваного періоду (рис. 5.2, г). Якщо у березні розвиток рослинного покриву в цих областях може обмежуватися температурним режимом й індекс VCI не відображує повної картини умов вегетації, то у квітні застосування цього індексу можна вважати коректним. У березні-квітні посухи спостерігалися, як й центральному Лісостепу, в два періоди. Найбільш інтенсивною була посуха 2003 р., яка розповсюдилася з весни на початок літа, при цьому у квітні-травні значення VCI склало 0%. В другому періоді інтенсивність весняних посух майже не змінювалася, VCI у квітні коливався в межах 14-24%. Тривала літня посуха спостерігалася майже у всій Лісостеповій зоні в 2000 р., і найбільш інтенсивною вона була в східній частині. Ця посуха також розповсюдилася на осінні місяці. Восени посухи спостерігалися у 2005 та 2011 рр., але наставали вже наприкінці вегетаційного періоду, в жовтні.

В західному Лісостепу (Карпатський регіон) навесні найбільш посушливим був період з 2003 по 2006 рр., при цьому сильна посуха спостерігалася у 2006 році, коли у квітні-травні значення VCI становило 0-3% (рис. 5.2, д). У 2004 р. спостерігалася весняно-літня посуха: з квітня по липень показники VCI коливалися в межах 24-30%. У березні-квітні посухи також виникали в період 2010-2012 рр. Влітку та на початку осені вегетаційні умови були сприятливими протягом всього досліджуваного періоду, окрім 2000 р. Восени посушливими видалися лише по 3 окремі місяці жовтня та листопада.

В Поліссі, як й в інших регіонах України, переважають весняні посухи, які спостерігалися також в два періоди, зазначених вище. Найбільш посушливим навесні є квітень, у березні значення VCI можуть бути некоректними через більш пізній початок вегетаційного періоду в північних районах (рис. 5.2, е). Найбільш тривалою та інтенсивною була весняно-літня посуха 2003 р., коли з квітня по червень значення VCI не перевищували 2-20%. У 2006 р. сильна посуха спостерігалася лише у весняні місяці, значення VCI коливались від 3 до 12%. Весняні посухи періоду 2009-2013 рр. були менш інтенсивними, у 2009 та 2011 рр. охоплювали всі весняні місяці, зі значеннями VCI від 19 до 34%. Влітку, як й в Карпатському регіоні, посуха спостерігалася в 2000 р. В осінній період спостерігалася три роки з посухами малої інтенсивності – у 2005, 2009, 2011 рр., при цьому всі вони фіксувалися наприкінці вегетаційного періоду, у жовтні.

Узагальнюючи особливості просторово-часового розподілу посух на території України, отриманих за допомогою індексу вегетаційних умов VCI, можна зробити висновок, що усім агрокліматичним зонам притаманна висока повторюваність весняних посух, особливо посушливим є східний Лісостеп. Найбільша кількість літніх посух спостерігається в Степу та центральному Лісостепу, при цьому деякі посухи розповсюджувалися й на початок осені. В Карпатському регіоні, Поліссі та східному Лісостепу літні посухи загалом, нетривалі, а нечисленні осінні посухи починалися лише наприкінці вегетаційного сезону, у жовтні.

Проведемо оцінку інформативності нормалізованого вегетаційного індексу NDVI з деякими метеорологічними індексами посух, що були розраховані та проаналізовані для території України раніше. Для порівняльного аналізу візьмемо аномалії відповідних величин до середнього значення, отриманого для періоду, що розглядається. Індекси посух, як й NDVI, були осереднені в межах основних агрокліматичних зон – Степ (за виключенням Криму), Лісостеп (за виключенням Карпат), Полісся. У табл. 5.1 представлені коефіцієнти кореляції між аномаліями NDVI та відповідними аномаліями індексів посух за весняно-літній, літній та літньо-осінній періоди. Для порівняння були взяті аномалії стандартизованого індексу опадів-евапотранспірації на масштабі 3 місяці (SPEI3), осереднені по трьом відповідним місяцям аномалії індексу Палмера (sc-PDSI) та гідротермічного коефіцієнту Селянинова (ГТК). Коефіцієнти кореляції були перевірені для 5% рівня значущості, і у табл. 5.1 значущі коефіцієнти виділені сірим кольором. Через невелику кількість даних у часових рядах частка значущих коефіцієнтів кореляції невелика.

Можна бачити, що по всіх індексах найліпший статистичний зв'язок спостерігається в Степовій зоні та влітку. Найвищі значення коефіцієнту кореляції відмічаються для індекса Палмера та гідротермічного коефіцієнту – 0,90 та 0,83 відповідно. Для SPEI3 зв'язок дещо слабкіший. У весняно-літній період для ГТК та SPEI3 коефіцієнти кореляції майже дорівнюють літнім показникам, а для індексу Палмера кореляційний зв'язок слабкий – 0,37. В літньо-осінній період для всіх індексів посух тіснота кореляційного зв'язку з NDVI зменшується, для ГТК коефіцієнт кореляції стає незначущим. Цей показник підкреслює той факт, що гідротермічний коефіцієнт восени частіше вказує на наявність посух, особливо в Степу, ніж інші індекси, що не завжди відповідає реальній ситуації.

В Лісостепу кореляційний зв'язок між індексами посух та NDVI майже вдвічі слабкіший, ніж в Степу, по всіх періодах. Значущі коефіцієнти кореляції спостерігаються для ГТК у весняний та літній періоди, восени

кореляційний зв'язок відсутній. Для індексу Палмера значуща кореляція з NDVI спостерігається лише влітку (0,49). Стандартизований індекс опадів-евапотранспірації має незначущий кореляційний зв'язок протягом всього вегетаційного сезону.

Таблиця 5.1

Коефіцієнти кореляції між аномаліями нормалізованого вегетаційного індексу NDVI та метеорологічними індексами посухи

Індекс посух	Агро-кліматична зона	Період		
		квітень - червень	червень - серпень	серпень - жовтень
SPEI3	Степ	0,75	0,79	0,68
	Лісостеп	0,39	0,34	0,32
	Полісся	0,26	0,15	0,34
sc-PDSI	Степ	0,37	0,90	0,63
	Лісостеп	0,08	0,49	0,32
	Полісся	0,02	0,27	0,21
ГТК	Степ	0,83	0,83	0,40
	Лісостеп	0,54	0,47	0,09
	Полісся	0,05	0,35	0,28

В Поліссі кореляційний зв'язок між індексами посух та NDVI найбільш слабкий. Для всіх індексів коефіцієнти кореляції виявилися незначущими.

Одержані результати узгоджуються з аналізом, проведеним для окремих регіонів Європи у дослідженні [153]. Авторами визначений просторовий розподіл коефіцієнтів кореляції у вузлах регулярної сітки з кроком 1 градус між індексами посух та NDVI в весняний і літній періоди, який показав наявність кореляційного зв'язку на рівні 0,4-0,6 для південно-західних районів України та швидке зменшення коефіцієнтів кореляції в північному напрямку. Осереднені по площі окремих територій (Іберія, Північна Африка,



Західна Туреччина) коефіцієнти кореляції для літнього періоду становлять для sc-PDSI від 0,56 до 0,78, для SPI3 від 0,65 до 0,71.

Для того, щоб визначити, як впливає посушливість на показники нормалізованого вегетаційного індексу, детально був розглянутий часовий хід NDVI, осереднений по території України, у роки з визначеними посухами з високою часовою дискретністю 8 днів, яка надається проектом GLAM. На рис. 5.3 представлений графік часового ходу швидкості зміни вегетаційного індексу протягом вегетаційних періодів: осереднений по 2000-2012 рр. та за окремі роки, коли в більшості областей спостерігалася посуха в весняний або літній періоди – 2003, 2006, 2007, 2009 та 2012 рр. Швидкість зміни NDVI відносна і представлена у відсотках до попереднього 8-ми денного проміжку часу.

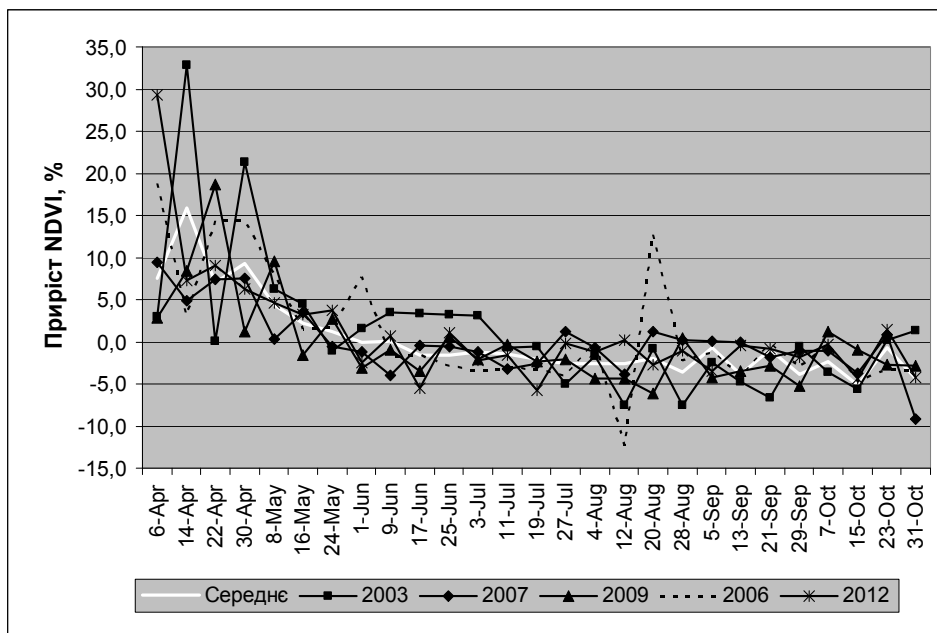


Рис. 5.3. Відносна швидкість зміни NDVI (%), осередненого по території України, протягом вегетаційних періодів

Отже, згідно кривої, що представляє осереднену швидкість зміни NDVI, позитивний приріст рослинного покриву на території України відбувається з початку квітня і триває до початку червня. При цьому, найбільша швидкість приросту відзначається в період з 14 по 21 квітня, потім швидкість наростання поступово убуває. Після першої декади червня спостерігається в середньому

стійкий негативний приріст з постійною швидкістю протягом всього літа, що свідчить про відносно стійкі погодні умови на даній території. Восени негативний приріст зберігається, але стає більш нестабільним через підвищення мінливості погодних умов.

Для виділених років з посухою характерні різкі коливання швидкості зміни NDVI навесні, у квітні. Найбільш інтенсивна весняна посуха 2003 р. була відзначена різким збільшенням NDVI в середині квітня, що можна пояснити пізнім настанням весни загалом на території країни порівняно з іншими роками, внаслідок чого бурний розвиток рослинності відбувався навіть на фоні посушливої погоди. Посушливі вегетаційні сезони 2007 та 2012 років характеризувалися меншим, ніж в середньому, приростом NDVI протягом весни та до середини літа. Літня посуха 2009 р. відбилася на збільшенні швидкості убування зросту рослинності в другій половині літа. Весняна посуха 2006 р. не виражена в швидкості зміни NDVI завдяки порівняно її невеликій інтенсивності та площі охоплення (західний Лісостеп і Полісся). Таким чином, відносна швидкість приросту рослинності, що фіксується змінами NDVI, може відбивати умови інтенсивних посух з великим відсотком охоплення досліджуваної території.

## 5.2. Особливості використання вегетаційного індексу NDWI

Розвиток технічних можливостей супутникового обладнання призвів до появи груп індексів, які використовують вузькі спектральні діапазони і пристосовуються для вирішення різних задач. Для оцінки вмісту вологи у рослинному покриві застосовують декілька індексів, отриманих у вузьких спектральних зонах видимого та ближнього інфрачервоного діапазону [143], найвідомішим з яких є нормалізований диференційний водний індекс NDWI (Normalized Difference Water Index), запропонований Б. Гао [154]. Для розрахунку цього індексу використовують два вузьких спектральних канали, зосереджених на довжинах хвиль близько 0,86 та 1,24 мкм. Обидва канали є

чутливими до вмісту рідини у рослинному покриві, а сам індекс є мірою кількості молекул рідкої води, які взаємодіють з сонячною радіацією, що надходить до рослинності. Абсорбцією рослинною рідиною на каналі 0,86 мкм можна знехтувати, на каналі 1,24 мкм вона є дуже слабкою. Розрахункова формула для NDWI має вигляд

$$NDWI = \frac{R_{0,86} - R_{1,24}}{R_{0,86} + R_{1,24}}, \quad (5.3)$$

де  $R_\lambda$  - інтенсивність відбитого сигналу на відповідній довжині хвилі  $\lambda = 0,86$  або  $1,24$  мкм.

NDWI є менш чутливим, на відміну від NDVI, до впливу атмосферного розсіювання за рахунок аерозолів. Порівняно з NDVI, нормалізований водний індекс не є повністю вільним від фонового впливу підстильної поверхні в районах, частково вкритих рослинністю. При цьому вплив оголеного ґрунту в NDWI є переважно негативним, тоді як зелена рослинність дає позитивний внесок [154]. Використання індексу NDWI для оцінки стану рослинного покриву передбачає той факт, що здорова рослинність в певні етапи розвитку має високий вміст рідкої води, який відбивається у високих значеннях індексу. Слід зазначити, що завдяки супутниковому зондуванню стресовий водний стан рослинності можна визначити ще до того, як він буде фіксуватися візуально. Посушливі умови призводять до зниження вологовмісту рослинності, що відбивається у зниженні значень NDWI і може бути використано також для оцінки пожежонебезпечності, наприклад, в лісових масивах.

Індекс NDWI знайшов застосування в фенології, адже він добре реагує як на стан рослинності, так й підстильної поверхні. Так, в роботі [155] представлені результати аналізу часових рядів NDWI для районів Сибіру, в яких були визначені особливості зміни індексу у важливих фенологічних фазах – початок вегетації, початок жовтіння листя, а також в період

сніготанення. Визначено, що протягом весни мінімум NDWI відповідає стану рослинності перед початком її зросту. Період зниження значень NDWI весною до мінімуму відповідає процесу сніготанення, а наступний за ним період зростання індексу характеризує початок росту рослинності. Такий злам в часовому ході NDWI навесні допомагає відділити дати закінчення сніготанення та початку вегетації. Восени дата початку пожовтіння листа наступає з моменту, коли NDWI починає зменшуватися. Потім настає період, коли NDWI знову починає зростати, що відповідає процесу накопичення снігу.

Такі властивості нормалізованого водного індексу можуть бути використані й для моделювання урожайності зернових культур, адже дата початку вегетації важлива для озимих та ярових культур, а вологовміст рослинності на стадіях розвитку відповідає умовам зросту та поточному стану рослини.

Розглянемо особливості часового ходу NDWI на території України в період з лютого по листопад 2000-2013 рр. На рис. 5.4 можна бачити, що навесні дати мінімальних значень NDWI коливаються в більшості випадків у межах 22-29 березня або 6-13 березня, тобто вегетаційний ріст починався після цих тижнів у 80% розглянутих років. Найраніше загальний по Україні вегетаційний сезон почався у 2007 р. – 18-25 лютого, найпізніше у 2003 р. – 7-14 квітня. Слід зазначити, що в багатьох областях України сніговий покрив є нестійким, в деякі роки він зовсім відсутній, тому проводити аналіз сніготанення за допомогою NDWI як для Сибіру, було б недоречним, хоча в будь-якому випадку у річному ході водного індексу завжди є мінімум навесні перед початком появи зеленої рослинності.

Різниця річного ходу NDWI між областями України, що належать до зон стійкого та нестійкого снігового покрову, добре помітна з прикладів на рис. 5.5. Можна бачити, що в Одеській області, починаючи з середини жовтня, значення NDWI майже не змінюються і лише протягом лютого незначно збільшуються, коли наприкінці зими утворюється сніговий покрив.

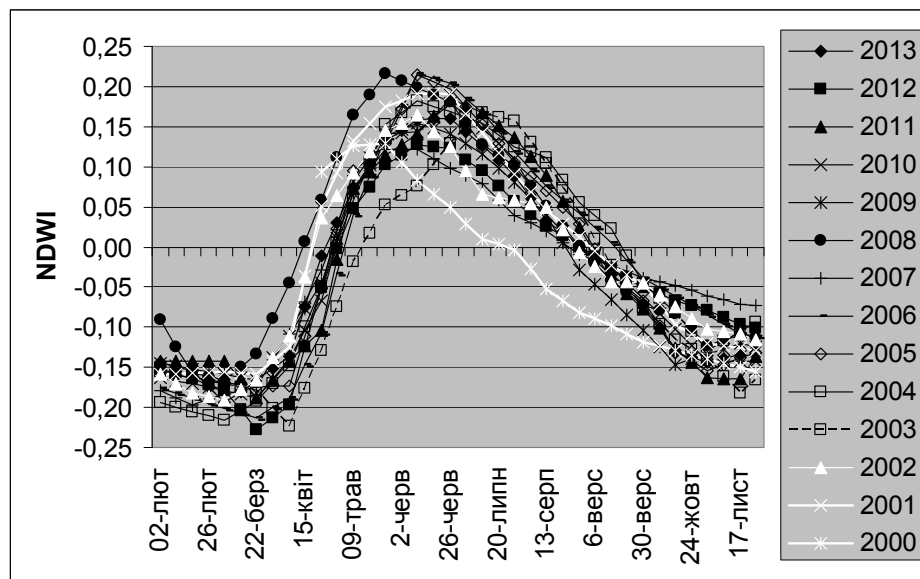


Рис. 5.4. Сезонний хід NDWI, осередненого по території України, в період з 2000 по 2013 роки

В Сумській області осінній спад NDWI завершується на початку листопада, потім значення поступово зростають, досягаючи максимуму у лютому, що відповідає накопиченню снігового покриву. Завдяки цьому мінімум NDWI навесні є дуже чітким і настає він наприкінці березня – початку квітня.

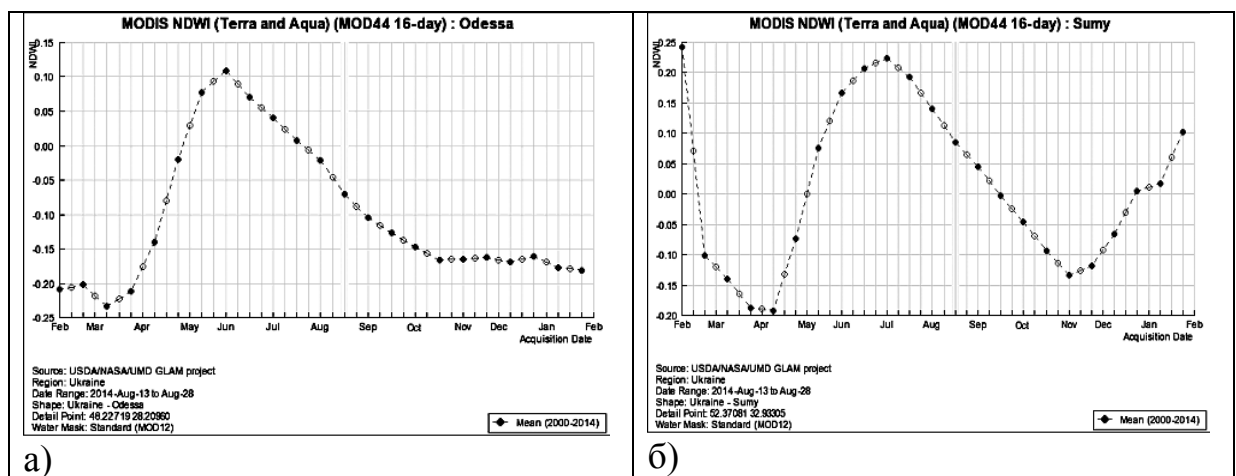


Рис. 5.5. Осереднені криві річного ходу NDWI по Одеській (а) та Сумській (б) областях (джерело <http://pekko.geog.umd.edu/usda/beta>)

Перехід осереднених по Україні значень NDWI через нуль весною відбувається між тижнями 15-22 квітня та 9-16 травня (див. рис. 5.4). Максимальні значення NDWI настають переважно у середині та наприкінці червня, при цьому в половині досліджених років максимум припадав на тиждень 10-17 червня. Найранніші дати максимуму спостерігалися на тижні 25 травня-1 червня у 2000 та 2008 роках, найпізніша дата – 12-19 липня 2003 року, коли спостерігалася тривала весняна посуха. Слід зазначити, що максимальні осереднені по території країни значення NDWI не перевищують 0,22 і досягають цих меж в сприятливі для вегетації роки без тривалих посух, такі як 2004-2006, 2013 рр. Якщо порівнювати максимуми NDWI в різних агрокліматичних зонах, то можна бачити (див. рис. 5.5), що в Степу (Одеська область) середня максимальна водність рослинності значно менше, ніж в Лісостепу (Сумська область), що відповідає характеру переважаючої рослинності.

Для одноманітності інтерпретації вегетаційних індексів, які використовуються в подальшому дослідженні, уведемо новий індекс на базі NDWI по аналогії з індексом VCI, що побудований на базі NDVI, – індекс вологості рослинності WVI (Wet Vegetation Index), який визначається математичним виразом [156]

$$WVI = \frac{NDWI - NDWI_{\min}}{NDWI_{\max} - NDWI_{\min}} \cdot 100\%, \quad (5.4)$$

де NDWI – поточне (тижневе, декадне тощо) значення нормалізованого водного індексу;

$NDWI_{\max}$ ,  $NDWI_{\min}$  – абсолютний міжрічний максимум та мінімум нормалізованого водного індексу за той самий період.

Як можна передбачити, чим більше різниця між поточним значенням NDWI та його абсолютним мінімумом в певний період, тим більш насичений молекулами води рослинний покрив, який зондується. Тому, як й для індексу

VCI, можна казати, що високі значення WVI (понад 80%) відповідають доброму стану рослинності з високим вмістом води, а значення WVI менші за 50% свідчать про сухість та втрату тургору рослин.

### 5.3. Моделювання урожайності зернових культур з використанням супутникових вегетаційних індексів

#### 5.3.1. Огляд методик моделювання

Оскільки супутникова інформація у вигляді вегетаційних індексів цілком відображує стан рослинного покриву, є доцільним розробка методів, які б пов'язували динаміку розвитку рослин та формування врожаю зі змінами величин супутникових параметрів. Пошуки таких зв'язків та успішні результати відображені у ряді наукових досліджень, як зарубіжних, так і вітчизняних, що дає змогу удосконалювати цей напрям моделювання урожайності з використанням нових видів інформації. Зрозуміло, що найліпші результати можна очікувати, якщо виділяти NDVI та NDWI орних земель конкретної культури. Супутникові дані високої роздільної здатності та цілеспрямований моніторинг окремих територій можуть надавати таку інформацію з високою просторово-часовою дискретністю. Виділення посівів окремих культур за допомогою супутникового моніторингу представляє складну технічну проблему, яка вирішується в задачах супутникового моніторингу сільськогосподарських територій. Як зазначається в роботах Антоненко В.С. та ін. [145, 157], параметри рослинного покриву, що отримуються за допомогою супутникової інформації, завжди носять елемент невизначеності, оскільки перехід від вимірюваних дистанційно характеристик (електромагнітного випромінювання) здійснюється непрямими, емпіричними методами, а якість електромагнітного сигналу залежить від багатьох чинників, зокрема стану атмосфери [158], які можуть суттєво знижувати його корисну складову в прикладних задачах.

З появою вегетаційних індексів за допомогою статистичних методів були знайдені зв'язки між біомасою або листовою поверхнею та NDVI. Так, в роботі Клещенко А.Д. та ін. [159] в рамках оперативної системи оцінки стану посівів озимої пшениці було запропоновано просте рівняння зв'язку між біомасою ( $M$ ) та NDVI у вигляді

$$M = 7780 \cdot NDVI - 4350.$$

Аналогічними емпіричними залежностями апроксимують стан листової поверхні, як наприклад, листового індексу кукурудзи ( $L$ ) для Краснодарського краю [160]

$$L^j = 0,07 \sum NDVI_{яp}^k - 0,16.$$

Показано, що онтогенетична крива, яка характеризує вплив зміни фізіологічного віку листя на інтенсивність фотосинтезу рослин, може бути апроксимована значеннями NDVI, а хід цього параметру відображує особливість низького темпу росту рослини в початковий період. Це дозволило включити вегетаційний індекс NDVI безпосередньо у динамічну модель продукційного процесу кукурудзи та отримати задовільні результати прогнозу урожайності кукурудзи для Південного та Північно-Кавказького федеральних округів РФ, при цьому справджуваність прогнозу зросла на 7,9-15,9%.

Якість вихідної інформації для побудови статистичних залежностей між вегетаційними індексами та параметрами рослинного покриву відіграє вирішальну роль для отримання надійних зв'язків. Оптимальним варіантом є виділення посівів окремих сільгоспкультур за маскою і побудова, наприклад, регресійної моделі для виділеного поля, але на практиці ця задача є складною та не завжди вирішуваною. Так, у спеціалізованих дослідженнях [145, 161], проведених на території України з метою автоматизації процесу ідентифікації



сільськогосподарських культур та визначенні площі посівів за даними супутникового моніторингу, отримано, що в умовах степової та лісостепової зон посіви озимої пшениці та ярого ячменю найкраще розпізнаються у травні (близько 80%), а вже у червні точність знижується на 10-20% через те, що спектральні характеристики цих культур стають менш вираженими на фоні інших посівів та рослинності. Посіви кукурудзи та цукрових буряків у травні майже не розрізняються через схожість спектральних відбивних характеристик, а у червні розпізнавальна якість невисока. Отже, при вирішенні задачі обрання вихідних даних вегетаційних індексів слід пам'ятати, що в фазі найбільшого росту сільськогосподарських рослин у травні і, особливо, у червні їх розрізнявальна здатність значно знижується, адже за спектральними характеристиками вони відносяться до одного класу, і при виділенні посівів за маскою вірогідність отриманих результатів може бути невисокою.

Оцінка урожайності сільгоспкультур може здійснюватися як на основі включення супутникових вегетаційних індексів до схеми вже існуючої моделі продуктивності рослин, так й шляхом розробки нових схем моделювання, зокрема регресійних моделей зв'язку показників урожайності з вегетаційними індексами. Наприклад, для розрахунку урожайності озимої пшениці ( $Y$ ) з конкретного поля (Дніпропетровська область) в експериментальному дослідженні пропонується використовувати емпіричну залежність [145]

$$Y = 82,7 \frac{M_j}{M_{opt}} e^{[-0.8(M_j/M_{opt}-0.4)]}$$

Тут  $M_j$ ,  $M_{opt}$  – фітомаса посівів, розрахована за супутниковими даними високої роздільної здатності у фазу появи нижнього вузла соломини і оптимальна для даного періоду вегетації, відповідно [162]. Середня відносна погрішність розрахунку урожайності в експерименті становила 14,3%, що

підтвердило можливість використання супутникової інформації для цієї задачі.

Як зазначається в [149], техніка створення композитів даних за деякий період часу від 7 до 16 днів суттєво зменшує рівень шуму у відбитому сигналі. Шум у даних спектро радіометра AVHRR створюється фундаментальними чинниками, які обмежують можливості дистанційного зондування рослинності. Найбільший внесок до рівня шуму належить хмарності, яка суттєво зменшує значення NDVI. Для корекції шуму розробляються різні чисельні алгоритми, але повністю від нього позбавитись наразі не вдається.

NDVI з успіхом використовується для визначення стану та пошкоджень посівів і пасовищ, але для зон з неоднорідною рослинністю виникають проблеми з інтерпретацією даних спостережень. В таких регіонах необхідно враховувати як фізико-кліматичні особливості, так й поточні погодні умови. Тобто, як зазначає Ф. Коган [148], NDVI може містити два компоненти, пов'язані з навколишнім середовищем і погодою. Погодний компонент зазвичай менший, а його коливання визначити складніше. Тому, якщо вирішується задача впливу погодних умов на вегетацію рослин з використанням NDVI, цей його компонент треба визначати окремо [149]. Для такої оцінки були запропоновані індекси VCI та TCI, а також сумісний індекс VHI, які базуються на використанні даних супутникового зондування підстильної поверхні Землі [151, 163-164]. Для того, щоб коректно використовувати VCI як оцінку умов вегетації, необхідно його попередньо оцінити з використанням залежних від поточної погоди характеристик рослинності на певній території, таких як висота рослинності, біомаса, урожайність сільськогосподарських культур.

Індекс температурних умов TCI (Temperature Condition Index) базується на яrkісних температурах (BT), отриманих у тепловому каналі зондування (Ch4) AVHRR. TCI використовується для визначення стресу рослинності,

пов'язаному з високими температурами, а також викликаною надмірною вологістю. Розрахунок TCI є аналогічним до VCI:

$$TCI = \frac{BT_{\max} - BT}{BT_{\max} - BT_{\min}} \cdot 100\%, \quad (5.5)$$

де  $BT$  – поточне декадне (або іншого періоду) значення яркісної температури;

$BT_{\max}$ ,  $BT_{\min}$  – абсолютний міжрічний максимум та мінімум яркісної температури індексу за той же період.

Високі температури протягом вегетаційного періоду відповідають несприятливим умовам й можливості посухи, низькі температури свідчать про переважно сприятливі умови.

Індекс здоров'я рослинності VHI (Vegetation Health Index) оцінює кумулятивно температурні та вологісні умови для розвитку рослинності та визначається за формулою

$$VHI = a \cdot VCI + (1 - a) \cdot TCI, \quad (5.6)$$

де  $a$  – коефіцієнт, що визначає внесок VCI та TCI до загального стану рослинності.

VHI змінюється від 0 (екстремальний стрес) до 100 (найсприятливіші умови). Як зазначається в [151], значення VHI можуть бути поділені на чотири категорії згідно прийнятої в США системі класифікації посух за їх інтенсивністю. Отже, виділяють: помірні посухи, з відповідним значенням  $VHI < 35$ ; сильні посухи –  $VHI < 25$ ; екстремальні посухи –  $VHI < 15$ ; надзвичайні посухи –  $VHI < 5$ .

Дослідження розповсюдженості посух на території України в період з 1991 по 2008 рік за допомогою VHI показало [151], що в деякі періоди посухи спостерігалися майже кожний рік (2001–2004 та 2006–2008 рр.), а протягом

1997-2000 рр. посух не було. В посушливі роки посуха охоплювала, як правило, не менше 5-10% території країни, а в особливо несприятливі роки вона поширювалася на 40-60%, як у 2007 р. Взагалі, за 20 років в Україні спостерігалось шість випадків посух різної інтенсивності, коли вони охоплювали 50-80% території країни.

Описані вегетаційні індекси широко використовуються для побудови регресійних моделей, які пов'язані безпосередньо з урожайністю (як правило, середньообластною) сільськогосподарських культур. Розглянемо деякі приклади такого моделювання за різними джерелами та на різних територіях.

В Українському ГМЦ запропонований метод регіонального моделювання урожайності озимої пшениці за наступною процедурою [165]. Урожайність  $Y_t$  певного року ( $t$ ) апроксимується виразом:

$$\hat{Y}_t = a_0 + a_1 Y_t; \quad dY_t = Y_t / \hat{Y}_t, \quad (5.7)$$

де  $\hat{Y}_t$  – трендова компонента урожайності, яка визначається агротехнікою;

$dY_t$  – випадкова компонента, яка залежить від погодних умов (метеорологічна складова урожайності).

Показано, що для території Одеської області кореляція  $dY_t$  для озимої пшениці з вегетаційними індексами (VCI, TCI та VHI) досягає максимуму протягом 2-3 тижнів у квітні-травні, що дає змогу використовувати в якості предиктанів регресійної моделі дані VHI на 5, 6 тижнях (місяць лютий, відбиває внесок зволоження через VCI) та 18, 19 тижнях (місяць травень, відбиває внесок температурного фактору через TCI) від початку року

$$dY = 0,286 - 0,057VHI_5 + 0,067VHI_6 - 0,041VHI_{18} + 0,044VHI_{19}. \quad (5.8)$$

Порівняння незалежно модельованих та фактичних даних урожайності озимої пшениці показало високу узгодженість з кореляцією 0,86 та похибкою 0,2 т/га.

В подальших дослідженнях [166, 167] побудовані прогностичні регресійні моделі для кожної області України, предиктором в яких були значення індексу NDVI на основі даних MODIS, осереднені по 16-денному композиту та за маскою посівних територій. Для апроксимації урожайності озимої пшениці використана лінійна залежність від тренду:

$$Y_i = T_i + dY_i,$$

де  $T_i$  – трендовий компонент;

$dY_i$  – випадковий компонент, який залежить від метеорологічних умов.

Регресійна модель побудована для зв'язку відхилення урожайності від тренду зі значеннями вегетаційного індексу NDVI:

$$dY_i = Y_i - T_i = f(NDVI_i) = b_0 + b_1 \cdot NDVI_i, \quad (5.9)$$

де  $NDVI_i$  – 16-денний композит значень індексу NDVI за такий проміжок часу ( $i$ ), який забезпечує мінімальне значення середньоквадратичної похибки на основі процедури крос-валідації.

Найбільш інформативними в різних областях України виявилися проміжки часу з 8 по 25 травня та з 6 по 22 квітня. Моделювання та незалежне тестування отриманих регресій на даних 2000-2010 рр. показало стійкість моделей та стандартну похибку прогнозування близько 6 ц/га.

Індекси VCI та TCI з успіхом були пристосовані для прогнозування урожайності зернових культур в Польщі. В роботах Дабровської-Зелінської К. та ін. [163-164, 168] проводився аналіз відповідності вказаних індексів умовам вегетації з визначенням періодів, в які кореляційний зв'язок урожайності озимої пшениці з вегетаційними індексами найкращий. Для валідації умов

вегетації зернових культур та побудови регресійних моделей їх урожайності в 49 воєводствах Польщі використовувалися дані супутників NOAA, спектрорадіометру AVHRR. Як показано авторами, виділення посівів за маскою не покращує кінцевий результат моделювання урожайності, тому для розрахунку вегетаційних індексів використовувалися супутникові дані, осереднені по площі кожного воєводства.

Лінійні регресійні моделі будувалися для відносної урожайності за предикторами VCI та TCI

$$Y/Y_{mean} = a + b \cdot TCI_{16} + c \cdot TCI_{22} + d \cdot VCI_{25}, \quad (5.10)$$

де  $Y$  – урожайність розрахункового року;

$Y_{mean}$  – середня урожайність за період, що розглядається;

Відношення  $Y/Y_{mean}$  виражено у відсотках. Індеси при VCI та TCI відповідають тижням від початку року, коли бралися відповідні значення предикторів: 16 та 22 тиждень для TCI та 25 тиждень для VCI. Середня похибка моделювання урожайності зернових культур на 1998 р. за даними з 1985 по 1997 рр. по воєводствах склала від 5 до 10% [164].

Для об'єктивізації визначення періодів, в які беруться індекси VCI та TCI, був введений так званий кумулятивний індекс  $CNDVI$  [168], який розраховується як накопичена сума вегетаційного індексу NDVI

$$CNDVI = \sum NDVI. \quad (5.11)$$

Розрахунок ведеться від початку квітня, коли розпочинається зростання рослин. Аналіз кумулятивного індексу показав, що при значенні  $CNDVI = 0,5$  починається активна вегетація, а при  $CNDVI = 4,0$  настає найліпший час для прогнозування урожайності. Тому до регресійних моделей включався індекс VCI на тижні, коли  $CNDVI > 0,5$ , а індекс TCI на тижні, коли  $CNDVI > 4,0$ . Показано, що кумулятивний індекс відображує швидкість росту рослинної

маси, тому його використання при побудові регресійних моделей буде непрямим чином відповідати за зниження урожайності сільськогосподарських культур, викликаних посухами.

### 5.3.2. Методика побудови емпіричних моделей урожайності озимої пшениці та ярого ячменя в Україні

Як показано вище, використання супутникових вегетаційних індексів у моделюванні урожайності зернових культур є вельми поширеним та перспективним напрямом в подальшому удосконаленні методик прогнозування завдяки високій якості вихідного матеріалу та його відносної доступності загальному користувачу на спеціалізованих веб-порталах.

Для побудови лінійних регресійних моделей урожайності основних зернових культур України – озимої пшениці та ярого ячменю, скористаємося даними супутникового зондування MODIS/NDVI та MODIS/NDWI проекту GLAM, які описані в п. 5.1, за період 2000-2013 рр. Дані про урожайність отримані з бюлетенів Держкомстата України (<http://agroua.net/statistics>).

Щоб оцінити ступень реагування вихідної інформації на умови вегетації та формування урожайності, проведемо порівняльний аналіз часового розподілу нормалізованого вегетаційного індексу NDVI з показниками урожайності зернових культур на території України. Значення NDVI взяті осереднено по території країни та без виділення за маскою посівів. Використані восьмиденні композити з обох супутників Terra і Aqua.

В табл. 5.2 представлена інформація щодо аномалій нормалізованого вегетаційного індексу по роках й місяцях та дані про коливання параметрів урожайності озимої пшениці і ярого ячменю по Україні в цілому. Можна бачити, що на показники урожайності значно впливають весняно-літні посухи, які добре відбиваються у негативних місячних аномаліях NDVI. Найбільші від'ємні відхилення NDVI від середнього значення у квітні-травні 2003 р. відповідають найбільшому за розглянуті роки зниженню урожайності.

На зниженні урожайності відбилася також весняна посуха 2006 р., хоча її інтенсивність й тривалість були меншими, ніж у 2003 р. Збитки врожаю у 2000 та 2007 рр. були меншими, але також супроводжувалися негативними аномаліями NDVI у травні та червні. Слід зазначити, що в даному аналізі не враховувалися умови зимівлі для озимої пшениці. Літні негативні аномалії NDVI майже не відбиваються в показниках урожайності.

Таблиця 5.2

Аномалії  $\Delta$ NDVI (% від середнього значення), відхилення від тренду ( $\Delta$ У, ц/га) і метеорологічна складова урожайності ( $\delta$ У, %) озимої пшениці та ярого ячменя

Рік	$\Delta$ NDVI							Озима пшениця		Ярий ячмінь	
	квітень	травень	червень	липень	серпень	Вересень	жовтень	$\Delta$ У	$\delta$ У	$\Delta$ У	$\delta$ У
2000	5,84	-1,49	-2,98	0,99	0,68	7,83	2,87	-4,5	-18,1	-1,4	-7,2
2001	14,70	8,38	1,92	-0,22	-2,31	2,17	4,92	4,1	16,5	4,5	22,4
2002	13,00	3,09	-2,20	-10,24	-1,02	1,18	5,13	5,3	20,9	3,8	18,4
2003	-19,90	-11,46	-5,44	9,31	7,76	0,14	-5,31	-11,3	-44,2	-3,9	-19,0
2004	-0,73	0,67	2,85	2,60	11,31	9,07	4,69	6,3	24,0	3,3	15,6
2005	-3,96	2,01	4,29	2,08	2,93	-3,16	-8,02	1,6	5,8	-0,2	-1,0
2006	-9,08	-2,13	5,31	2,05	-1,70	5,17	7,14	-2,5	-9,2	-0,6	-2,8
2007	6,74	-1,86	-7,30	-8,64	-4,76	3,04	8,31	-3,3	-11,5	-5,5	-24,8
2008	19,83	8,93	1,54	-2,86	-5,34	-6,58	0,66	6,8	22,9	6,8	30,3
2009	0,43	0,87	-3,14	-3,90	-6,27	-8,89	-10,03	1,7	5,6	0,8	3,6
2010	-0,96	-0,18	0,17	3,97	-3,57	-2,72	-3,94	-3,8	-12,2	-3,9	-17,4
2011	-7,23	-0,18	-0,51	4,85	2,56	-5,55	-10,86	2,4	7,7	1,3	6,1
2012	-3,93	-3,37	-3,27	-5,56	-4,03	-1,03	3,26	-3,6	-11,4	-0,4	-2,0
2013	0,05	-3,52	0,55	1,40	-3,43	-0,69	-2,58	1,3	4,0	-0,4	-1,8

Виходячи з описаних вище результатів моделювання урожайності зернових культур, отриманих іншими авторами, проведемо ряд експериментів по побудові регресійних моделей для моделювання урожайності озимої пшениці та ярого ячменю. Лінійні регресійні моделі будемо будувати для



деяких областей України, при цьому в якості предиктантів оберемо середні по областях абсолютну  $Y_{аб}$  та відносну урожайність  $Y_{вд}$ , яка для поточного року розраховується за формулою

$$Y_{вд} = \frac{Y_{аб}}{Y_{тр}} \cdot 100\%, \quad (5.12)$$

де  $Y_{аб}$  – абсолютна урожайність (ц/га);

$Y_{тр}$  – урожайність зернової культури (ц/га) за трендом на поточний рік, яка визначається за методом гармонійних ваг [59].

Будемо розв'язувати задачу моделювання з двома наборами предикторів:

- з урахуванням циркуляції атмосфери через індекс блокування, тоді зі значеннями VCI, WVI та ЕСВІ загальне рівняння регресії має вигляд

$$Y = a + b \cdot ECBI + c \cdot VCI + d \cdot WVI; \quad (5.13)$$

- без урахування циркуляції атмосфери, тоді зі значеннями VCI та WVI загальне рівняння регресії має вигляд

$$Y = a + c \cdot VCI + d \cdot WVI. \quad (5.14)$$

В рівняннях (5.13)-(5.14):  $Y = (Y_{аб}; Y_{вд})$ ;  $a, b, c$  – коефіцієнти регресії.

Обрання дат (періодів), в які для кожної області береться значення предикторів VCI, WVI та ЕСВІ, було здійснено шляхом оцінки тісноти кореляційного зв'язку між урожайністю та відповідним параметром у весняно-літній період, тобто предиктори для кожної області та сільгоспкультури бралися в ті тижні, коли коефіцієнт кореляції був максимальним.

За відсутності незалежної вибірки даних для оцінки якості моделювання урожайності озимої пшениці та ярого ячменю в дослідженні використано прийом виключення окремих років при побудові регресій та подальшому прогнозуванні для них. По розглянутих областях по чергово з регресії були виключені роки з 2007 по 2013. Цей період характеризувався як посушливими роками (2007, 2012 рр.), так й сприятливими для формування високого врожаю (2008, 2013 рр.). Змодельовані таким чином по незалежних даних середньообласні значення урожайності озимої пшениці та ярого ячменю оцінювалися за такими критеріями:

- середня абсолютна похибка  $\Delta\bar{Y}$  (ц/га), яка дорівнює

$$\Delta\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|Y_{\phi} - Y_{np}|)_i, \quad (5.15)$$

де  $Y_{\phi}$  – фактичне значення урожайності;

$Y_{np}$  – прогнозоване значення урожайності;

$n$  – кількість випадків прогнозу;

- стандартне відхилення  $\delta$ ;

- точність прогнозу  $Tч_{пр}$  (%), яка визначається як

$$Tч_{пр} = 100 - \Delta\bar{Y}_a, \quad (5.16)$$

де  $\Delta\bar{Y}_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(|Y_{\phi} - Y_{np}|)_i}{(Y_{\phi})_i} \cdot 100\%$  – середня абсолютна похибка, виражена

у відсотках;

- відносна ефективність  $Eф_{вд}$ , яка показує, наскільки використання моделей з супутниковими вегетаційними індексами ефективніше за прогнозування урожайності за трендом [167]

$$E\phi_{\text{од}} = \frac{\sum_{i=1}^n ((y_{\phi} - y_{mp})_i)^2}{\sum_{i=1}^n ((y_{np} - y_{\phi})_i)^2}. \quad (5.17)$$

Далі розглянемо результати моделювання урожайності озимої пшениці і ярого ячменя для областей України за побудованими регресійними моделями.

### 5.3.3. Моделювання урожайності озимої пшениці

В табл. 5.3 і 5.4 наведені результати моделювання абсолютної ( $Y_{\text{аб}}$ ) і відносної ( $Y_{\text{вд}}$ ) урожайності озимої пшениці для 7 південних областей і АР Крим з урахуванням циркуляційних особливостей атмосфери та без них [156]. Як можна бачити, блокування атмосфери на формування врожаю найбільший вплив має у березні або лютому. Для більшості областей максимальний коефіцієнт кореляції урожайності з місячними значеннями ЕСВІ коливається в межах -0,40...-0,60, а зворотній зв'язок вказує на переважання посиленої зональної циркуляції у лютому-березні, яка, очевидно, сприяє формуванню підвищеної кількості опадів і зволоженню ґрунту напередодні вегетаційного періоду. Індекс умов вегетації VCI для більшості областей має найкращу кореляцію з урожайністю в період з 15 по 23 травня, і лише в Кіровоградській області припадає на 9-16 червня. Для індексу вологості рослинності WVI період найкращого кореляційного зв'язку починається з 16 травня і триває до 8 червня по різних областях. Таким чином, за наявності вихідних даних по Одеській, Херсонській, Миколаївській областях та АР Крим прогноз урожайності може бути складений одразу після 23 травня. В Донецькій області прогнозування можливе після 31 травня, в Запорізькій та Дніпропетровській областях – після 8 червня, а в Кіровоградській області – після 16 червня. Тобто, завчасність прогнозування становить 1,5-2 місяця до початку збирання врожаю.

Таблиця 5.3

Параметри регресії та статистичні оцінки моделювання абсолютної урожайності ( $Y_{аб}$ , ц/га) озимої пшениці по областях степової зони

Область	Місяць для ЕСВІ	Дата для VCI	Дата для WVI	Коефіцієнти регресії*				Коефіцієнти*		Стандартна похибка*	Значущість F*
				a	b	c	d	множинної кореляції	детермінації		
Одеська	березень	16-23/05	16-23/05	12,97	-4,58	0,09	0,14	0,85	0,72	4,83	0,0038
				11,57	-	0,10	0,17	0,84	0,71	4,73	0,0011
Херсонська	лютий	16-23/05	16-23/05	11,50	-2,28	0,11	0,13	0,90	0,82	3,62	0,0005
				10,89	-	0,11	0,14	0,90	0,81	3,51	0,0001
Миколаївська	березень	16-23/05	16-23/05	11,48	-1,12	0,11	0,14	0,86	0,74	4,82	0,0026
				11,16	-	0,11	0,14	0,86	0,74	4,60	0,0006
Запорізька	березень	8-15/05	1-8/06	7,88	2,15	0,11	0,19	0,93	0,86	3,07	0,0001
				8,79	-	0,09	0,18	0,93	0,86	2,97	0,00002
Кіровоградська	березень	9-16/06	1-8/06	17,30	-8,13	0,06	0,15	0,82	0,68	6,40	0,0084
				15,27	-	0,10	0,18	0,80	0,64	6,39	0,0034
Дніпропетровська	березень	8-15/05	1-8/06	8,54	-2,56	0,13	0,20	0,93	0,86	4,34	0,0001
				7,73	-	0,14	0,22	0,93	0,86	4,18	0,00002
АР Крим	лютий	16-23/05	16-23/05	13,96	0,53	-0,06	0,20	0,89	0,79	2,60	0,0009
				14,04	-	-0,06	0,19	0,89	0,79	2,48	0,0002
Донецька	березень	16-23/05	24-31/05	12,80	-2,41	-0,04	0,29	0,85	0,71	4,77	0,0044
				11,79	-	-0,03	0,30	0,84	0,71	4,58	0,0011

\* - по кожній області статистичні оцінки регресії надані в послідовності зверху вниз: з врахуванням ЕСВІ та без нього.

Таблиця 5.4

Параметри регресії та статистичні оцінки моделювання відносної урожайності ( $Y_{вд}$ ) озимої пшениці по областях степової зони

Область	Місяць для ЕСВІ	Дата для VCI	Дата для WVI	Коефіцієнти регресії*				Коефіцієнти*		Стандартна похибка*	Значущість F*
				a	b	c	d	множинної кореляції	детермінації		
Одеська	березень	16-23/05	16-23/05	0,503	-0,157	0,005	0,004	0,83	0,69	0,20	0,0069
				0,455	-	0,005	0,005	0,83	0,68	0,19	0,0020
Херсонська	лютий	16-23/05	16-23/05	0,487	-0,151	0,004	0,006	0,94	0,87	0,12	0,00008
				0,447	-	0,004	0,006	0,93	0,86	0,13	0,00002
Миколаївська	березень	16-23/05	16-23/05	0,400	0,080	0,005	0,006	0,90	0,80	0,17	0,0007
				0,423	-	0,005	0,006	0,90	0,80	0,16	0,0001
Запорізька	березень	8-15/05	1-8/06	0,316	0,058	0,004	0,007	0,93	0,86	0,12	0,0001
				0,341	-	0,004	0,006	0,93	0,86	0,11	0,00002
Кіровоградська	березень	9-16/06	1-8/06	0,509	-0,142	0,003	0,005	0,85	0,73	0,19	0,0034
				0,474	-	0,004	0,006	0,85	0,72	0,18	0,0009
Дніпропетровська	березень	8-15/05	1-8/06	0,328	-0,124	0,005	0,006	0,92	0,84	0,16	0,0002
				0,289	-	0,005	0,007	0,92	0,84	0,15	0,00005
АР Крим	лютий	16-23/05	16-23/05	0,660	-0,027	-0,003	0,009	0,93	0,86	0,08	0,0001
				0,656	-	-0,004	0,009	0,93	0,86	0,08	0,00002
Донецька	березень	16-23/05	24-31/05	0,447	-0,062	-0,0004	0,009	0,82	0,68	0,18	0,0081
				0,421	-	0,0000	0,010	0,82	0,68	0,18	0,0021

\* - по кожній області статистичні оцінки регресії надані в послідовності зверху вниз: з врахуванням ЕСВІ та без нього.

Статистичні оцінки моделювання для абсолютної та відносної урожайності (див. табл. 5.3 та 5.4) показують, що для всіх областей коефіцієнти як множинної кореляції, так й детермінації є високими, а побудовані регресії за F-критерієм Фішера (для 5% рівня значущості) є статистично значущими. Стандартна похибка моделювання для абсолютної урожайності становить в середньому 4,31 ц/га. Якщо порівнювати статистичні показники двох варіантів моделювання, то для Херсонської, Миколаївської, Кіровоградської областей та АР Крим введення трендової компоненти поліпшує показники регресії, для Запорізької області переваг немає, а для Одеської, Дніпропетровської та Донецької областей показники регресій для відносної урожайності гірше, ніж для абсолютної.

Моделювання абсолютної урожайності без врахування циркуляції атмосфери (див. табл. 5.3), тільки за даними індексів VCI та WVI, в цілому, дає незначно кращий результат по більшості областей – стандартна похибка моделювання в середньому дорівнює 4,18 ц/га для абсолютних значень урожайності. Для моделей відносної урожайності результати майже однакові (див. табл. 5.4). Такі результати свідчать про те, що вплив циркуляційного фактору в південних областях ранньою весною на формування врожаю є менш значущим, ніж температурно-вологісні умови, що складаються протягом весни і на початку літа. Це дозволяє використовувати більш простий варіант регресійного рівняння на базі тільки супутникових вегетаційних індексів.

Порівняно зі степовою зоною, в областях Лісостепу в більшості випадків урожайність озимої пшениці найкраще корелює з індексом блокування у березні (зворотній зв'язок), а також у травні (прямий зв'язок) (табл. 5.5 та 5.6). Період високого статистичного зв'язку між індексом умов вегетації VCI та урожайністю коливається в досі широких межах: від початку травня в Київській області до початку липня в Черкаській області. Для індексу вологості рослинності WVI період високого кореляційного зв'язку також тривалий – від другої половини травня в Вінницькій області до другої

половини червня в Полтавській області. Такий широкий розкид в датах може пояснюватися більш складним характером рослинного покриву, в якому значно більшу долю, порівняно зі Степом, займає висока листова рослинність з іншими відбивними характеристиками, ніж трав'яна рослинність, і яка „глушить” корисний сигнал від зернових культур. Це, загалом, погіршує якість вихідної інформації, яка використовується для застосування вегетаційних індексів саме до конкретної задачі моделювання урожайності сільгоспкультур. Виходячи з відібраних періодів, найранніший прогноз урожайності озимої пшениці можна скласти для Київської та Харківської області – після 8 червня, найпізніший прогноз буде складений для Черкаської області – після 10 липня.

Аналіз статистичних параметрів побудованих регресій показує, що загалом, вони нижчі, ніж для степової зони. Так, в регресіях з врахуванням циркуляційного фактору коефіцієнти множинної регресії (та детермінації) коливаються від 0,73 (0,54) в Вінницькій області до 0,91 (0,82) в Житомирській області для моделей абсолютної урожайності, та від 0,75 (0,56) в Київській області до 0,89 (0,79) в Полтавській області для моделей відносної урожайності. Слід зазначити, що для двох областей значущі регресії отримані лише за одним з варіантів моделей: для Житомирської області – за моделлю абсолютної урожайності, для Київської області – за моделлю відносної урожайності (див. табл. 5.5 та 5.6).

В областях Лісостепу більшу значущість набуває включення до моделей індексу блокування, ніж в Степу. Так, моделювання без ЕСВІ, лише по двох вегетаційних індексах, дає гірші статистичні оцінки регресій в більшості областей, окрім Полтавської, а в Сумській та Черкаській областях регресії стають незначущими. Отже, для більшості областей лісостепової зони для прогнозу урожайності озимої пшениці можна рекомендувати використання регресійних рівнянь на базі індексу блокування ЕСВІ та вегетаційних індексів VCI та WVI, побудованих для абсолютної урожайності.

Таблиця 5.5

Параметри регресії та статистичні оцінки моделювання абсолютної урожайності  $Y_{аб}$  (ц/га) озимої пшениці по областях лісостепової зони

Область	Місяць для ЕСВІ	Дата для VCI	Дата для WVI	Коефіцієнти регресії*				Коефіцієнти*		Стандартна похибка*	Значущість F*
				a	b	c	d	множинної кореляції	детермінації		
Вінницька	березень	9-16/06	16-23/05	14,45	11,14	0,24	0,146	0,73	0,54	6,67	0,0448
				18,69	-	0,15	0,12	0,69	0,47	6,80	0,0299
Черкаська	березень	3-10/07	1-8/06	43,94	-23,75	-0,21	-0,01	0,81	0,66	6,81	0,0108
				35,15	-	-0,12	0,16	0,59	0,35	8,96	0,0958
Полтавська	березень	1-8/06	17-24/06	13,63	-4,11	0,07	0,20	0,76	0,58	7,54	0,0301
				12,94	-	0,08	0,22	0,75	0,56	7,30	0,0106
Сумська	травень	9-16/06	9-16/06	16,18	31,54	0,02	0,20	0,76	0,58	6,37	0,0270
				19,29	-	0,04	0,13	0,55	0,30	7,87	0,1391
Харківська	березень	24-31/05	1-8/06	21,50	-4,00	-0,09	0,21	0,76	0,57	7,49	0,0309
				21,71	-	-0,10	0,23	0,75	0,56	7,25	0,0110
Житомирська	травень	16-23/05	24-31/05	27,766	21,332	-0,137	0,121	0,91	0,82	2,76	0,0005
				27,564	-	-0,113	0,105	0,71	0,50	4,36	0,0214

\* - по кожній області статистичні оцінки регресії надані в послідовності зверху вниз: з врахуванням ЕСВІ та без нього.



Таблиця 5.6

Параметри регресії та статистичні оцінки моделювання відносної урожайності ( $Y_{вд}$ ) озимої пшениці по областях лісостепової зони

Область	Місяць для ЕСВІ	Дата для VCI	Дата для WVI	Коефіцієнти регресії*				Коефіцієнти*		Стандартна похибка*	Значущість F*
				a	b	c	d	множинної кореляції	детермінації		
Вінницька	березень	9-16/06	16-23/05	0,577	0,179	0,005	0,004	0,78	0,61	0,13	0,0197
				0,646	-	0,003	0,003	0,76	0,57	0,13	0,0092
Черкаська	березень	3-10/07	1-8/06	0,937	-0,383	-0,003	0,003	0,84	0,71	0,15	0,0052
				0,795	-	-0,002	0,006	0,75	0,56	0,17	0,0112
Полтавська	березень	1-8/06	17-24/06	0,353	-0,052	0,004	0,007	0,89	0,79	0,16	0,0011
				0,344	-	0,004	0,007	0,89	0,79	0,16	0,0002
Сумська	травень	9-16/06	9-16/06	0,594	0,718	0,004	0,003	0,82	0,67	0,17	0,0089
				0,665	-	0,005	0,002	0,71	0,50	0,19	0,0222
Харківська	березень	24-31/05	1-8/06	0,647	-0,124	-0,002	0,007	0,78	0,61	0,22	0,0195
				0,654	-	-0,002	0,008	0,77	0,60	0,22	0,0065
Київська	травень	30/04-7/05	1-8/06	0,731	0,590	0,001	0,005	0,75	0,56	0,17	0,0351
				0,746	-	0,002	0,002	0,65	0,43	0,18	0,0472

\* - по кожній області статистичні оцінки регресії надані в послідовності зверху вниз: з врахуванням ЕСВІ та без нього.

Для Київської області доцільно використовувати модель відносної урожайності з включенням трендової компоненти.

Надамо оцінку прогнозування озимої пшениці по областях України за моделями абсолютної та відносної урожайності озимої пшениці, які базуються на трьох предикторах – індексі блокування ЕСВІ та вегетаційних індексах VCI та WVI. Для моделей абсолютної урожайності (табл. 5.7) в степових областях середня абсолютна похибка прогнозу коливається у межах 2,34-5,88 ц/га. При цьому найкращі показники фіксуються для Херсонської області та АР Крим, найгірші – для Кіровоградської та Донецької областей. Середнє стандартне відхилення становить 5,23 ц/га.

Таблиця 5.7

Оцінки прогнозування за моделями абсолютної урожайності ( $Y_{аб}$ )  
озимої пшениці

Область	$\Delta\bar{Y}$	$\delta$	$T_{чпр}$	$E_{фвд}$
Степ				
Одеська	4,74	6,49	83,66	0,69
Херсонська	2,34	3,44	91,16	3,30
Миколаївська	4,98	6,24	82,21	0,84
Запорізька	3,11	3,65	86,81	2,15
Кіровоградська	5,88	5,76	80,67	0,79
Дніпропетровська	3,36	4,24	88,93	2,77
АР Крим	2,50	5,33	90,21	2,74
Донецька	5,06	6,67	82,29	0,58
<b>Середнє</b>	<b>4,00</b>	<b>5,23</b>	<b>85,74</b>	<b>1,73</b>
Лісостеп				
Вінницька	4,52	7,04	88,56	0,31
Черкаська	8,37	11,00	79,40	0,31
Сумська	5,41	8,26	81,06	0,46
Полтавська	6,82	6,96	80,70	0,29
Харківська	6,51	8,26	78,72	0,52
Житомирська	2,44	2,60	91,56	1,69
<b>Середнє</b>	<b>5,68</b>	<b>7,35</b>	<b>83,33</b>	<b>0,60</b>

Точність прогнозування в середньому дорівнює близько 86%, при цьому перевищує 90% в Херсонській області та АР Крим. За оцінками відносної

ефективності, запропоновані моделі значно поліпшують якість прогнозу порівняно з трендом в Херсонській, Запорізькій, Дніпропетровській областях та АР Крим та є менш ефективними в інших областях Степу.

В областях лісостепової зони оцінки прогнозування за моделями абсолютної урожайності є декілька гіршими, ніж в Степу (див. табл. 5.7). Так, середня абсолютна похибка прогнозу складає 5,68 ц/га, а середнє стандартне відхилення перевищує 7 ц/га. При цьому найкращі показники фіксуються в Житомирській області (2,44 та 2,60 ц/га відповідно), а найгірші результати в Черкаській області (8,37 та 11,00 ц/га відповідно). Середня точність прогнозування складає 83%, перевищуючі при цьому 91% лише в Житомирській області. Відносна ефективність є низькою, але в Житомирській області модель дає суттєву перевагу над моделлю тренда.

Оцінки прогнозування за моделями відносної урожайності (табл. 5.8) для областей степової зони є кращими, ніж для абсолютної урожайності. Так, середня абсолютна похибка та стандартне відхилення становлять, відповідно, 3,70 та 5,21 ц/га. Середня точність прогнозу дорівнює 86,52% та коливається від 84% в Кіровоградській і Донецькій областях до понад 90% в Херсонській області і АР Крим. Середня ефективність становить 2,10, при цьому моделі відносної урожайності є більш ефективними, ніж модель тренду в шести областях, а в Херсонській області та АР Крим ефективність перевищує 4,41.

Для областей лісостепової зони моделі відносної урожайності також є більш ефективними, ніж абсолютної урожайності (порівняти табл. 5.7 та 5.8). Показники середньої абсолютної похибки та стандартного відхилення дорівнюють 4,39 та 5,71 ц/га відповідно, що принаймні на 1,2 ц/га нижче, ніж для абсолютної урожайності. Середня точність прогнозування становить майже 87%, що на 4% краще, ніж для моделей  $Y_{аб}$ , та майже така ж, як й для степової зони. В Київській і Вінницькій областях точність прогнозу перевищує 90%. Середня ефективність прогнозування дорівнює 1,17, при цьому найбільш ефективними є прогнози для Київської, Сумської та Полтавської областей.

Таблиця 5.8

Оцінки прогнозування за моделями відносної урожайності ( $U_{вд}$ )  
озимої пшениці

Область	$\Delta\bar{U}$	$\delta$	$T_{чпр}$	$Eф_{вд}$
Степ				
Одеська	4,02	6,01	85,37	0,72
Херсонська	2,42	3,27	90,99	4,41
Миколаївська	4,76	6,24	82,53	1,00
Запорізька	2,94	3,42	87,82	2,39
Кіровоградська	4,63	5,41	84,31	1,10
Дніпропетровська	3,93	4,85	86,60	2,13
АР Крим	2,30	5,70	90,69	4,41
Донецька	4,57	6,78	83,86	0,62
<b>Середнє</b>	<b>3,70</b>	<b>5,21</b>	<b>86,52</b>	<b>2,10</b>
Лісостеп				
Вінницька	3,64	4,54	90,44	0,72
Черкаська	5,63	7,30	85,85	0,62
Сумська	4,72	5,76	83,99	1,16
Полтавська	5,39	6,32	83,24	0,93
Харківська	4,59	7,18	83,49	0,87
Київська	2,38	3,18	94,33	2,69
<b>Середнє</b>	<b>4,39</b>	<b>5,71</b>	<b>86,89</b>	<b>1,17</b>

Таким чином, моделі відносної урожайності озимої пшениці дають більш точні результати для обох агрокліматичних зон України, тобто врахування технологічної складової формування урожайності у вигляді тренда та метеорологічного фактора у вигляді вегетаційних індексів та індексу блокування є більш оптимальним для вирішення задачі прогнозування урожайності. Найбільші похибки прогнозу фіксувалися у роки з відносно високою урожайністю (наприклад, 2008-2009, 2013 рр.), коли показники вегетаційних індексів були також високі, але вони виявляються не настільки чутливими, щоб відобразити амплітуду коливань урожайності. В ці роки модель з врахуванням тренда була ефективною для більшості розглянутих областей.

#### 5.3.4. Моделювання урожайності ярого ячменя

В табл. 5.9 та 5.10 наведені результати моделювання урожайності ярого ячменя для південних областей та АР Крим з урахуванням циркуляційних особливостей атмосфери та без них. Найбільший вплив блокування атмосфери на формування урожайності має в більшості областей у березні, при цьому в АР Крим цей вплив найзначущий у квітні, а в Луганській області – у травні. Як й для озимої пшениці, переважає зворотній кореляційний зв'язок між значеннями ЕСВІ та урожайністю. Індекс умов вегетації VCI для більшості областей має найкращу кореляцію з урожайністю в період з 24 травня по 16 червня. Найранніші дати відмічені для Запорізької області та АР Крим – 8-15 травня, а найпізніша дата припадає на Луганську область – 17-24 червня. Індекс вологості рослинності WVI найкраще корелює з урожайністю ярого ячменя по областях в період з 16 травня по 8 червня, і лише в Луганській області припадає на 17-24 червня.

Отже, за наявності вихідних даних прогноз урожайності ярого ячменя може бути складений по АР Крим після 23 травня, по Запорізькій області після 31 травня, по Херсонській, Миколаївській, Кіровоградській, Дніпропетровській та Донецькій областях після 8 червня, по Одеській області – після 16 червня й по Луганській області – після 24 червня. Тобто, вже в середині червня по більшості південних областей із задовільною завчасністю можна отримати дані щодо очікуваної урожайності ярого ячменя.

Статистичні оцінки моделювання абсолютної та відносної урожайності (див. табл. 5.9 та 5.10) показують, що для всіх областей коефіцієнти як множинної кореляції, так й детермінації, є високими, а побудовані регресії за F-критерієм Фішера (для 5% рівня значущості) є статистично значущими, окрім Луганської області для моделі відносної урожайності. Стандартна похибка моделювання становить в середньому 3,26 ц/га, при цьому вона найнижча в Херсонській та Миколаївській областях і найвища в Запорізькій області.

Таблиця 5.9

Параметри регресії та статистичні оцінки моделювання абсолютної урожайності ярого ячменя ( $Y_{аб}$ , ц/га) по областях степової зони України

Область	Місяць для ЕСВІ	Дата для VCI	Дата для WVI	Коефіцієнти регресії*				Коефіцієнти*		Стандартна похибка*	Значущість* F
				a	b	c	d	множинної кореляції	детермінації		
Одеська	березень	9-16/06	16-23/05	6,788	2,126	0,143	0,082	0,84	0,70	3,71	0,0059
				7,639	-	0,136	0,066	0,83	0,69	3,57	0,0015
Херсонська	березень	1-8/06	24-31/05	7,213	5,163	-0,033	0,287	0,95	0,91	2,29	0,0000
				8,008	-	-0,037	0,252	0,93	0,87	2,57	0,0000
Миколаївська	березень	24-31/05	1-8/06	6,791	3,654	0,089	0,144	0,93	0,86	2,52	0,0002
				7,523	-	0,094	0,108	0,92	0,84	2,54	0,0000
Запорізька	березень	8-15/05	24-31/05	5,851	-1,548	0,067	0,145	0,76	0,58	5,03	0,0275
				5,205	-	0,080	0,148	0,76	0,58	4,81	0,0084
Кіровоградська	березень	24-31/05	1-8/06	12,218	-1,039	0,178	0,011	0,89	0,79	3,28	0,0010
				11,951	-	0,180	0,019	0,89	0,79	3,14	0,0002
Дніпропетровська	березень	1-8/06	24-31/05	11,621	-3,156	0,207	-0,071	0,90	0,80	3,06	0,0008
				10,684	-	0,218	-0,054	0,89	0,79	3,02	0,0002
АР Крим	квітень	8-15/05	16-23/05	8,749	3,853	0,046	0,082	0,75	0,56	3,72	0,0341
				9,074	-	0,030	0,093	0,74	0,55	3,61	0,0126
Донецька	березень	1-8/06	24-31/05	9,174	-2,697	0,089	0,055	0,86	0,73	2,75	0,0033
				8,056	-	0,096	0,075	0,85	0,72	2,70	0,0010
Луганська	травень	17-24/06	17-24/06	10,607	12,427	0,083	0,009	0,74	0,54	2,99	0,0418
				10,771	-	0,100	-0,015	0,56	0,31	3,50	0,1258

\* - по кожній області статистичні оцінки регресії надані в послідовності зверху вниз: з врахуванням ЕСВІ та без нього.

Таблиця 5.10

Параметри регресії та статистичні оцінки моделювання відносної урожайності ярого ячменя ( $Y_{вд}$ ) по областях степової зони України

Область	Місяць для ЕСВІ	Дата для VCI	Дата для WVI	Коефіцієнти регресії*				Коефіцієнти*		Стандартна похибка*	Значущість* F
				a	b	c	d	множинної кореляції	детермінації		
Одеська	березень	9-16/06	16-23/05	0,411	0,037	0,006	0,004	0,82	0,67	0,19	0,0085
				0,425	-	0,006	0,004	0,82	0,67	0,18	0,0021
Херсонська	березень	1-8/06	24-31/05	0,403	0,261	-0,001	0,014	0,96	0,93	0,11	0,0000
				0,443	-	-0,001	0,013	0,95	0,90	0,12	0,0000
Миколаївська	березень	24-31/05	1-8/06	0,412	0,147	0,005	0,008	0,92	0,85	0,14	0,0002
				0,441	-	0,005	0,006	0,92	0,84	0,14	0,0000
Запорізька	березень	8-15/05	24-31/05	0,345	-0,106	0,004	0,007	0,76	0,58	0,27	0,0282
				0,301	-	0,005	0,008	0,76	0,58	0,26	0,0088
Кіровоградська	березень	24-31/05	1-8/06	0,682	-0,197	0,008	-0,002	0,88	0,77	0,15	0,0015
				0,632	-	0,008	-0,0001	0,86	0,75	0,15	0,0005
Дніпропетровська	березень	1-8/06	24-31/05	0,655	-0,341	0,004	0,002	0,87	0,76	0,15	0,0018
				0,554	-	0,005	0,004	0,83	0,69	0,17	0,0017
АР Крим	квітень	8-15/05	16-23/05	0,547	0,418	0,003	0,005	0,81	0,65	0,18	0,0121
				0,582	-	0,001	0,006	0,77	0,59	0,19	0,0073
Донецька	березень	1-8/06	24-31/05	0,493	-0,113	0,005	0,004	0,86	0,74	0,15	0,0029
				0,446	-	0,005	0,004	0,85	0,73	0,14	0,0008
Луганська	травень	17-24/06	17-24/06	0,729	0,761	0,004	0,002	0,69	0,48	0,20	0,0775
				0,739	-	0,005	0,0002	0,52	0,27	0,23	0,1727

\* - по кожній області статистичні оцінки регресії надані в послідовності зверху вниз: з врахуванням ЕСВІ та без нього.

Моделювання урожайності без врахування циркуляції атмосфери, тільки за даними індексів VCI та WVI, як для абсолютної, так й відносної урожайності, загалом дає декілька кращі результати по стандартній похибці (в середньому 3,24 ц/га) та значущості регресії, але для деяких областей, таких як Херсонська та Миколаївська, неврахування ЕСВІ погіршує результат, а в Луганській області регресія стає незначущою.

Тобто, для формування урожайності ярого ячменя в південних областях, як й для озимої пшениці, циркуляційний фактор на початку весни є менш впливовим, ніж температурно-вологісний режим у травні-червні, що дозволяє використовувати регресійні рівняння, побудовані на базі тільки супутникових вегетаційних індексів.

В табл. 5.11 та 5.12 наведені результати моделювання урожайності ярого ячменя для деяких областей України, що відносяться до зони Лісостепу та Полісся. Як можна бачити, найбільший ефект врахування блокування атмосфери на формування урожайності відзначається в більшості областей у березні, але в Житомирській та Сумській областях найтісніший кореляційний зв'язок з ЕСВІ спостерігається у травні, а в Закарпатті – у лютому.

Періоди найкращої кореляції індексу умов вегетації VCI та індексу вологості рослинності WVI з урожайністю ярого ячменя коливаються в широких межах для різних областей. Так, для VCI цей період починається з 16-23 травня в Житомирській області та закінчується 17-24 червня в Харківській області, на Закарпатті ця дата найранніша і припадає на період 29 березня-5 квітня. Для WVI періоди високої кореляції починаються з 8-15 травня в Рівненській області та закінчуються 17-24 червня на Закарпатті, при цьому в більшості областей дати приходяться на кінець травня – початок червня. Таким чином, прогноз урожайності ярого ячменя може бути складений наприкінці травня для Сумської області, після 8 червня – для Житомирської, Черкаської та Полтавської областей, після 16 червня – для Вінницької та Рівненської області, та після 24 червня – для Харківської та Закарпатської областей.



Таблиця 5.11

Параметри регресії та статистичні оцінки моделювання абсолютної урожайності ярого ячменя ( $Y_{аб}$ , ц/га) по областях лісостепової зони та Полісся

Область	Місяць для ЕСВІ	Дата для VCI	Дата для WVI	Коефіцієнти регресії*				Коефіцієнти*		Стандартна похибка*	Значущість* F
				a	b	c	d	множинної кореляції	детермінації		
Вінницька	березень	9-16/06	1-8/06	16,202	0,568	0,114	0,036	0,74	0,56	3,96	0,0368
				16,426	-	0,110	0,033	0,75	0,56	3,78	0,0115
Черкаська	березень	24-31/05	1-8/06	22,889	-4,867	0,151	-0,056	0,76	0,58	3,93	0,0275
				22,286	-	0,165	-0,037	0,72	0,52	4,00	0,0170
Полтавська	березень	24-31/05	1-8/06	17,178	-2,901	0,069	0,053	0,87	0,76	2,52	0,0018
				17,197	-	0,079	0,056	0,85	0,73	2,57	0,0008
Харківська	березень	17-24/06	24-31/05	22,708	0,925	-0,109	0,128	0,70	0,50	4,60	0,0669
				22,376	-	-0,103	0,124	0,70	0,50	4,39	0,0235
Житомирська	травень	16-23/05	1-8/06	21,681	14,040	-0,041	0,070	0,84	0,71	2,04	0,0046
				21,800	-	-0,027	0,057	0,56	0,32	3,00	0,1217
Закарпатська	лютий	29/03-5/04	17-24/06	20,695	-0,353	-0,080	0,077	0,77	0,60	3,29	0,0240
				20,536	-	-0,077	0,078	0,77	0,59	3,14	0,0070
Рівненська	травень	9-16/06	8-15/05	21,437	7,338	0,023	0,057	0,79	0,62	2,43	0,0169
				19,954	-	0,042	0,070	0,75	0,56	2,51	0,0109

\* - по кожній області статистичні оцінки регресії надані в послідовності зверху вниз: з врахуванням ЕСВІ та без нього.

Таблиця 5.12

Параметри регресії та статистичні оцінки моделювання відносної урожайності ярого ячменя ( $Y_{вд}$ ) по областях лісостепової зони та Полісся

Область	Місяць для ЕСВІ	Дата для VCI	Дата для WVI	Коефіцієнти регресії*				Коефіцієнти*		Стандартна похибка*	Значущість* F
				a	b	c	d	множинної кореляції	детермінації		
Вінницька	березень	9-16/06	1-8/06	0,755	-0,078	0,002	0,002	0,77	0,60	0,12	0,0230
				0,725	-	0,002	0,003	0,77	0,59	0,11	0,0074
Черкаська	березень	24-31/05	1-8/06	0,817	-0,121	0,007	-0,002	0,86	0,75	0,11	0,0026
				0,802	-	0,007	-0,002	0,85	0,72	0,11	0,0010
Полтавська	березень	24-31/05	1-8/06	0,759	-0,120	0,004	0,001	0,91	0,83	0,09	0,0003
				0,760	-	0,005	0,001	0,90	0,80	0,09	0,0001
Сумська	травень	24-31/05	16-23/05	0,848	0,272	0,003	0,001	0,80	0,64	0,12	0,0142
				0,892	-	0,005	-0,001	0,79	0,59	0,12	0,0073
Харківська	березень	17-24/06	24-31/05	1,109	0,052	-0,006	0,005	0,71	0,50	0,21	0,0627
				1,090	-	-0,005	0,005	0,71	0,50	0,20	0,0220
Закарпатська	лютий	29/03-5/04	17-24/06	1,000	-0,074	-0,004	0,002	0,70	0,49	0,14	0,0723
				0,966	-	-0,004	0,002	0,69	0,48	0,14	0,0284

\* - по кожній області статистичні оцінки регресії надані в послідовності зверху вниз: з врахуванням ЕСВІ та без нього.

Тобто, для більшості розглянутих областей завчасність прогнозування є задовільною, адже прогноз може бути складений вже у середині червня.

Аналіз статистичних показників моделювання для абсолютної та відносної урожайності показав (див. табл. 5.11 та 5.12), що не для всіх областей можуть бути отримані статистично значущі рівняння регресії. Так, за F-критерієм Фішера (для 5% рівня значущості) незначущими виявилися рівняння регресії абсолютної урожайності для Сумської області (не включені до табл. 5.11), а також для Харківської області з врахуванням індексу блокування та для Житомирської області без його врахування. Для відносної урожайності статистично незначущими виявилися рівняння для Житомирської та Рівненської областей (не включені до табл. 5.12), а також для Закарпатської та Харківської областей – рівняння з врахуванням ЕСВІ. Загалом, включення індексу блокування до регресійного рівняння підвищує коефіцієнти множинної кореляції та детермінації, але й збільшує показник статистичної значущості. Коефіцієнти множинної кореляції є нижчими, ніж для степової зони, і коливаються у межах 0,70-0,90, при цьому для побудованих рівнянь моделювання відносної урожайності статистичні оцінки є кращими, ніж для абсолютної урожайності. Стандартна похибка моделювання становить в середньому 3,03 ц/га і є найнижчою в Полтавській та Рівненській областях (2,52 та 2,43 ц/га відповідно).

Таким чином, для лісостепової зони та Полісся умови впливу циркуляційного фактору є досить різноманітними та повинні враховуватися (на базі індексу блокування ЕСВІ) індивідуально для кожної області.

Розглянемо оцінки прогнозування урожайності ярого ячменя за побудованими моделями (табл. 5.13 та 5.14). В степовій зоні середня абсолютна похибка прогнозу становить 3,44 ц/га для моделі абсолютної урожайності та 3,72 ц/га для моделі з врахуванням тренду. Найкращі показники спостерігаються в Одеській, Херсонській, Миколаївській областях та АР Крим (у межах 2,13-2,64 ц/га для абсолютної урожайності), найгірші результати - в Запорізькій та Кіровоградській областях.

Стандартне відхилення для абсолютної урожайності в більшості областей Степу коливається в межах 2,35-3,60 ц/га, для відносної урожайності показники декілька вище, але середнє значення перевищує 4 ц/га в обох моделях переважно за рахунок Запорізької та Кіровоградської області. Середня точність прогнозування за моделлю абсолютної урожайності вище, ніж за моделлю відносної – 76 та 74% відповідно. При цьому в Одеській, Херсонській, Миколаївській областях та АР Крим точність перевищує 85%.

Таблиця 5.13

Оцінки прогнозування за моделями абсолютної урожайності ( $Y_{аб}$ ) ярого ячменя по областях України

Область	$\Delta\bar{Y}$	$\delta$	$T_{ч_{пр}}$	$E\phi_{вд}$
Степ				
Одеська	2,13	3,60	85,83	1,88
Херсонська	2,15	2,79	85,86	7,11
Миколаївська	2,64	3,20	82,97	3,60
Запорізька	6,31	8,59	52,15	0,77
Кіровоградська	4,84	5,33	63,42	0,92
Дніпропетровська	3,56	4,62	75,81	1,45
АР Крим	2,36	3,61	85,09	1,20
Донецька	3,51	2,35	77,03	1,13
<b>Середнє</b>	<b>3,44</b>	<b>4,26</b>	<b>76,02</b>	<b>2,31</b>
Лісостеп та Полісся				
Вінницька	2,55	5,33	90,93	0,13
Черкаська	4,93	6,91	79,04	0,71
Полтавська	3,36	3,58	85,60	2,80
Житомирська	1,83	2,23	92,19	2,50
Рівненська	2,77	3,51	89,30	0,38
Закарпатська	3,02	4,75	87,52	0,49
<b>Середнє</b>	<b>3,08</b>	<b>4,38</b>	<b>87,43</b>	<b>1,17</b>

Ефективність моделювання є високою в більшості південних областей, окрім Запорізької та Кіровоградської, що свідчить про доцільність використання розроблених моделей. При цьому, більш ефективними та точними є моделі абсолютної урожайності, що вказує на переважання впливу

поточних погодних умов на формування врожаю ярого ячменя, тоді як трендова компонента може його згладжувати. Найбільші похибки прогнозу траплялися у роки з посухою в першій половині літа (2007, 2010, 2011 роки), адже по більшості областей дати прогнозу припадають на початок червня, що не дозволяє врахувати погіршення погодних умов в наступному і потребує корегування прогностичних значень іншим шляхом.

Таблиця 5.14

Оцінки прогнозування за моделями відносної урожайності ( $Y_{\text{вд}}$ ) ярого ячменя по областях України

Область	$\Delta\bar{Y}$	$\delta$	$T_{\text{чпр}}$	$E_{\text{фвд}}$
Степ				
Одеська	2,64	4,06	81,49	1,62
Херсонська	2,49	2,75	83,18	7,01
Миколаївська	2,58	3,50	81,91	3,08
Запорізька	6,72	8,13	48,16	0,75
Кіровоградська	4,97	6,22	63,00	0,95
Дніпропетровська	3,58	4,74	74,41	1,42
АР Крим	3,33	5,09	80,61	1,02
Донецька	3,43	2,32	77,44	1,22
<b>Середнє</b>	<b>3,72</b>	<b>4,60</b>	<b>73,77</b>	<b>2,13</b>
Лісостеп				
Вінницька	2,70	4,76	89,72	0,13
Черкаська	4,31	5,60	80,96	0,85
Сумська	2,27	3,48	88,79	0,83
Полтавська	2,66	3,20	87,74	2,45
<b>Середнє</b>	<b>2,99</b>	<b>4,26</b>	<b>86,80</b>	<b>1,07</b>

В областях Лісостепової зони та Полісся в моделях абсолютної урожайності абсолютна похибка коливається у межах 1,83-4,93 ц/га, і в середньому є трохи вищою, ніж для моделей відносної урожайності (див. табл. 5.13 та 5.14). Стандартне відхилення для обох варіантів моделей в середньому перевищує 4 ц/га. Оцінки ефективності та точності прогнозування для моделей абсолютної урожайності є декілька вищими, ніж для моделей відносної урожайності, але зважаючи на різний набір областей по двом

варіантам моделей, цю різницю можна вважати несуттєвою. Тому, для прогнозування урожайності ярого ячменя в областях Лісостепу можна рекомендувати використання моделей абсолютної урожайності, окрім Сумської області, де найкращі результати дає модель відносної урожайності.

### Висновки до розділу 5

Супутникові вегетаційні індекси набули широкого використання в задачах моніторингу стану підстильної поверхні і рослинного покриву, а також у моделюванні продуктивності сільськогосподарських культур.

Застосування індексу NDVI та побудованого на його базі індексу вегетаційних умов VCI для аналізу посух в Україні за період 2000-2013 рр. показало їх високу ефективність, порівняну з метеорологічними індексами посух, у визначенні посушливих періодів. При цьому виявлена закономірність між аномаліями NDVI у весняно-літній період та коливаннями урожайності сільськогосподарських культур.

Для моделювання урожайності озимої пшениці та ярого ячменя запропоновано використовувати регресійні моделі, побудовані на базі супутникових вегетаційних індексів та індексу регіонального блокування атмосфери. В моделях враховано: погодні умови – за допомогою індексу VCI; вологовміст рослин – за допомогою уведеного в дослідженні індексу вологості рослинності WVI; регіональна циркуляція атмосфери – через індекс блокування ЕСВІ.

Чисельні експерименти з моделювання урожайності озимої пшениці та ярого ячменя за побудованими моделями абсолютної та відносної урожайності показали високу точність прогнозу для більшості розглянутих областей степової та лісостепової зон, при цьому прогноз може бути складений із завчасністю 1,5-2 місяця до початку збирання врожаю.

## ВИСНОВКИ

Посушливі явища різних типів, тривалості та інтенсивності є характерною особливістю кліматичних умов України у минулому, поточному та, за прогнозами, майбутньому часі. Розв'язання наукової проблеми визначення посухи як комплексного явища, яке формується під дією відповідного температурно-вологісного режиму в умовах певних циркуляційних атмосферних процесів, та застосування отриманих кількісних показників для удосконалення методики прогнозування урожайності сільськогосподарських культур, дозволило зробити такі висновки та рекомендації.

1. Вперше одержані найбільш ймовірні місячні поля гідротермічного коефіцієнту показали, що в сучасний період основною структурною особливістю таких полів у теплому сезоні є квазіширотна спрямованість значень ГТК у межах країни: значення індексу звичайно зменшуються з північного заходу та півночі на південь та південний схід. Протягом сезону спостерігається наростання посушливості та її поширення за площею до серпня-вересня. Найнижчі показники ГТК ( $< 0,5$ ) спостерігаються в південних областях. В цих районах (Одеська, Херсонська, Запорізька області та АР Крим) майже дві третини місяців (60-70%) у розглянутих теплих сезонах були з посухою, а 20-40% всіх місяців відзначилися екстремальною посухою. На решті території повторюваність посух, зазвичай, менше за 50%, та зменшується на захід і північ до 20-30%.

2. Виконана оцінка просторово-часового розподілу посух по агрокліматичним зонам України за допомогою полів п'яти різних метеорологічних індексів посух (ГТК Г.Т. Селянинова, індекс атмосферної посушливості Д.А. Педея ( $S_a$ ), індекс суворості посух Палмера ( $sc$ -PDSI), стандартизовані індекси опадів (SPI) та опадів-евапотранспірації (SPEI)) показала, що найбільш часто зональні помірні та сильні посухи трапляються у весняні місці. Протягом літа просторовий масштаб посух зменшується при

збереженні інтенсивності, а восени посухи слабшають, але стають знов більш поширеними. Загалом, по території країни переважають м'які посухи. У розглянутому періоді за всіма індексами наростання кількості та інтенсивності посух відбулося після 2000 року і досягло максимуму у 2007-2012 роках.

3. На базі п'яти індексів посух вперше виконано порівняльний аналіз щодо їх інформативності і узгодженості у виявленні посух та створено каталог сезонних посух для основних агрокліматичних зон України за період 1995-2012 рр. Досліджуваний період характеризувався переважанням весняно-літніх посух, найбільш суворими з яких по всіх трьох зонах були посухи у 2000, 2003 та 2007 рр., коли їх інтенсивність сягала критеріїв сильної та екстремальної. Повністю посушливими виявилися вегетаційні періоди 2007, 2009 та 2012 років. Комплексний аналіз показав, що найліпше всі індекси узгоджуються між собою в Степу, а також у весняний і літній сезони. В усіх зонах найтісніший кореляційний зв'язок спостерігається між індексами Педя та SPEI ( $r$  понад  $|0,90|$ ), висока тіснота зв'язку також відмічена для ГТК майже з усіма індексами. Виявлено, що ГТК завищує кількість посух у літній та осінній сезони порівняно з іншими індексами, тому можна рекомендувати доповнювати його аналіз одним з стандартизованих індексів (SPI, SPEI).

4. У короткостроковій перспективі на 2020-2050 р. в умовах очікуваного підвищення температури повітря та збільшення кількості опадів загальна кількість посух (за даними індексу SPI) в Україні незначно збільшиться. Посухи протягом вегетаційного сезону за сценарієм RCP2.6 будуть спостерігатися кожний другий рік, за сценарієм RCP8.5 – раз на два-три роки. За м'яким сценарієм зростатиме повторюваність посух в північно-східних областях та Карпатському регіоні, за жорстким сценарієм найбільша повторюваність посух припадає на Приазов'я, Закарпаття та північ країни. В сценарії RCP2.6 переважатимуть м'які посухи, в сценарії RCP8.5 зростатиме доля помірних, сильних та екстремальних посух (особливо в Степу), при цьому поява останніх двох типів очікується не більше 1-3 разів за 31 рік.



В часовому ході посух за обома сценаріями прогнозується настання двох посушливих періодів – у 2020-х та 2040-х роках. Найбільш жорстока посуха, яка досягатиме екстремальної інтенсивності, прогнозується у 2042-2045 рр., а на півдні триватиме до 2050 р.

5. Динаміка посух та продуктивність сільськогосподарських рослин зазнає як циклічних коливань через процеси загальної циркуляції атмосфери, так й неперіодичних коливань, пов'язаних зі змінами регіональних синоптичних процесів. Виявлено, що всі значущі посухи в Україні протягом 1995-2012 рр. спостерігалися у східну фазу квазідворічного коливання зонального вітру в екваторіальній атмосфері (КДК). У західну фазу КДК перевищення урожайності озимої пшениці та ярого ячменя над східною фазою в середньому по Україні становить 19,7 і 15,7% відповідно. При цьому, у східну фазу вище міжрічна мінливість урожайності, а відхилення від середнього значення переважно від'ємні, що свідчить про менш сприятливі погодні умови і недобір врожаю, порівняно із західною фазою.

6. В регіональній циркуляції атмосфери для формування масштабної посухи в Україні, як *необхідна умова*, повинен розвиватися загальний антициклонічний процес, тоді в якості *достатніх умов* можуть виступати як блокуючі процеси, локалізовані в межах країни, так й процеси транзитного антициклогенезу високої повторюваності.

Показано, що основні осередки блокувань в періоди сильних весняно-літніх посух в Україні зосереджуються переважно в межах території країни, вторинні – на схід або захід від неї. Запропонований новий регіональний індекс блокування ЕСВІ (Європейський континентальний індекс блокування) при утворенні значущих посух вказує на блокуючий процес ( $ЕСВІ > 0$ ), звичайно, не менше 4-х пентад протягом місяця, що може слугувати синоптичною ознакою настання тривалого посушливого періоду.

Одержана типова структура регіонального висотного баричного поля в місяці з посухою в Україні має наступні ознаки:

- розщеплення зонального потоку на дві гілки – більш інтенсивну в північних районах Європи і менш інтенсивну над районами Середземномор'я;
- наявність розвинутого субтропічного гребеня над Атлантикою на захід від Піренейського півострова;
- наявність малоградієнтного поля підвищеного тиску над більшою частиною території України та баричної улоговини над її східними районами.

7. Періоди блокування супроводжуються певними змінами запасів доступної потенціальної (ДПЕ) та кінетичної енергії в атмосфері, що дозволяє визначати еволюцію блокуючого процесу. Під час блокування зростають запаси зональної і вихрової кінетичної енергії та зменшуються запаси зональної і вихрової ДПЕ. Перетворення енергії звичайно відбувається через інтегральний перехід зональної ДПЕ та кінетичної енергії в вихрову ДПЕ та кінетичну енергію відповідно, при цьому інтенсивність перетворення суттєво вище у верхній половині тропосфери і зростає при посиленні процесу блокування. Перехід зональної ДПЕ в зональну кінетичну енергію відбувається в періоди, що передують максимальній інтенсивності блокування. Вихрові компоненти ДПЕ та кінетичної енергії мають високу часову мінливість через тісний зв'язок з еволюцією рухомих вихорів синоптичного масштабу.

8. Теоретично обґрунтовано можливість побудови регресійних рівнянь для моделювання середньобласної урожайності озимої пшениці та ярого ячменя через кількісну оцінку інформативності обраних предикторів у визначенні посушливих умов та їх взаємозв'язку з коливаннями урожайності. Показано, що здатність супутникового вегетаційного індексу NDVI у відбитті посушливих умов є найбільш високою в степових районах та у весняно-літній сезон. Для оцінки вологовмісту рослин та їх загального тургору запропоновано індекс вологості рослинності WVI, який базується на значеннях NDWI і залежить від поточних погодних умов. Врахування індексу блокування атмосфери ЕСВІ в моделях урожайності озимої пшениці та ярого ячменя не дає однозначних переваг для всіх агрокліматичних зон, що

визначає різний набір предикторів та вид моделі (абсолютна або відносна урожайність) для кожної області окремо.

9. Побудовані регресійні рівняння для прогнозування урожайності озимої пшениці дозволяють складати прогноз для більшості областей степової зони одразу після 31 травня - 8 червня, і лише в Кіровоградській області – після 16 червня. В областях Лісостепу прогноз може бути складений після 16 червня, а в Черкаській області – після 10 липня.

Точність прогнозування в областях Степу за моделями абсолютної та відносної урожайності становить в середньому 86%, середня абсолютна похибка 3,7-4,0 ц/га, а ефективність вдвічі вище за модель тренда. Для областей Лісостепу більш ефективними є моделі відносної урожайності. Показники середньої абсолютної похибки дорівнюють 4,4 ц/га, середня точність прогнозування становить майже 87%. Тобто, якщо в степовій зоні можна використовувати спрощений варіант розрахунку абсолютної урожайності, то для областей лісостепової зони рекомендується попереднє визначення трендової компоненти з наступним використанням прогностичних рівнянь для відносної урожайності озимої пшениці.

10. Побудовані регресійні рівняння для прогнозування урожайності ярого ячменя дозволяють складати прогноз в областях Степу після 8-16 червня, і лише в Луганській області – після 24 червня. Для більшості областей Лісостепу та Полісся прогноз урожайності може бути складений після 8-16 червня, а для Харківської та Закарпатської областей – після 24 червня.

Для областей Степу більш точними є моделі абсолютної урожайності. Середня абсолютна похибка становить близько 3,5 ц/га, середня точність прогнозування 76%. Розроблені моделі є вдвічі ефективнішими за модель тренду. В областях Лісостепу та Полісся моделі абсолютної та відносної урожайності мають приблизно однакову точність. Середня абсолютна похибка становить близько 3 ц/га, середня точність прогнозування 87%. Тобто, для прогнозування ярого ячменя в більшості розглянутих областей України можна рекомендувати використання моделей абсолютної

урожайності, які є більш чутливими до поточних погодних умов. Але у сезони, коли спостерігається поточна тенденція до виникнення або посилення посушливих явищ після дат складення прогнозу, доречним буде додатковий розрахунок за рівняннями відносної урожайності з врахуванням тренду, який скорегує завищення прогностичних значень.

Таким чином, одержані у дисертаційній роботі результати мають високий рівень достовірності через використання обширного матеріалу сучасних вихідних даних провідних кліматичних і прогностичних центрів та випробуваних методик дослідження, доповнюють існуючі уявлення щодо просторово-часового розподілу посух у поточних та майбутніх кліматичних умовах. Створений каталог індексів посух може стати методичною базою для розробки системи моніторингу посух, а визначені типові характеристики полів метеорологічних величин та індексів дають змогу удосконалювати середньострокові та довгострокові методи прогнозу посушливих явищ.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Клімат України // За ред. В.М. Липінського, В.А. Дячука, В.М. Бабіченко. – К.: Вид. Раєвського, 2003. – 343 с.
2. Бучинский И.Е. Засухи и суховеи / И.Е. Бучинский. – Л.: Гидрометеиздат, 1976. – 214 с.
3. Давитая Ф.Ф. Засухи в СССР и научное обоснование мер борьбы с ними по природным зонам / Ф.Ф. Давитая // Вопросы земледелия и борьба с эрозией почв в степных и лесостепных районах СССР. Т 1. – Саратов, 1959. – С. 54-58.
4. Руденко А.И. Типы засух вегетационного периода и их характеристика / А.И. Руденко // Засухи в СССР, их происхождение, повторяемость и влияние на урожай / Под ред. А.И. Руденко. – Л.: Гидрометеиздат, 1958. – С. 46-53.
5. Алпатьев А.М. Характеристика и географическое распространение засухи / А.М. Алпатьев, В.Н. Иванова // Засухи в СССР, их происхождение, повторяемость и влияние на урожай / Под ред. А.И. Руденко. – Л.: Гидрометеиздат, 1958. – С. 31-46.
6. Барабаш М.Б., Емельянова Ж.Л. Закономерности пространственно-временного распределения засушливых условий на Украине / М.Б. Барабаш, Ж.Л. Емельянова // Труды УкрНИГМИ. – 1990. – Вып. 238. – С. 94-101.
7. Бучинский И.Е. Засухи, суховеи и пыльные бури на Украине и борьба с ними / И.Е. Бучинский. – К.: Урожай, 1970. – 236 с.
8. Цубербиллер Е.А. Агрометеорологическая характеристика суховеев / Е.А. Цубербиллер. – Л.: Гидрометеиздат, 1959. – 120 с.
9. Волеваха В.О. Суховії на Україні / В.О. Волеваха, В.І. Ромушкевич. – К.: Видавництво Київський Університет, 1972. – 140 с.
10. Хлебникова Е.И. Засухи / Е.И. Хлебникова, Т.В. Павлова, Н.А. Сперанская // Методы оценки последствий изменения климата для физических и

- биологических систем / Под ред. С.М. Семенова. – М.: Росгидромет, НИЦ “Планета”, 2012. – С. 126-164.
11. Селянинов Г.Т. Происхождение и динамика засух / Г.Т. Селянинов // Засухи в СССР. Их происхождение, повторяемость и влияние на урожай / Под ред. А.И. Руденко. – Л.: Гидрометеиздат, 1958. – С. 5-30.
  12. Синицина Н.И. Агроклиматология / Н.И. Синицина, И.А. Гольцберг, Э.А. Струнников. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 342 с.
  13. Гейко Л.А. Оценка статистических характеристик гидротермического коэффициента на Украине / Л.А. Гейко // Труды УкрНИГМИ. – 1990. – Вып. 238. – С. 89-94.
  14. Барабаш М.Б. К уточнению критерия засушливости для Украины / М.Б. Барабаш, З.Л. Десяткова // Труды УкрНИГМИ. – 1979. – Вып. 174. – С. 18-21.
  15. Алпатьев А.М. О показателе засухи / А.М. Алпатьев // Метеорология и гидрология. – 1955. – № 4. – С. 40-49.
  16. Педь Д.А. О показателе засухи и избыточного увлажнения / Д.А. Педь // Труды Гидрометцентра СССР. – 1975. – Вып. 156. – С. 19-38.
  17. Педь Д.А. Климатические особенности атмосферных засух и избыточного увлажнения / Д.А. Педь // Труды Гидрометцентра СССР. – 1975. – Вып. 156. – С. 39-76.
  18. Садоков В.П. Усовершенствованные методы прогнозов атмосферной, почвенной, атмосферно-почвенной засушливости и засух / В.П. Садоков, В.Ф. Козельцева, Н.Н. Кузнецова, Т.М. Федунова // Труды Гидрометцентра России. – 2005. – Вып. 340. – С. 3-15.
  19. Садоков В.П. Образование атмосферно-почвенной засухи с учетом почвенной и атмосферной засушливости / В.П. Садоков, В.Ф. Козельцева, Н.Н. Кузнецова // Труды Гидрометцентра России. – 2002. – Вып. 337. – С. 48-56.

20. Садоков В.П. Анализ летних засух 1972, 1975, 1984 и 2002 гг. / В.П. Садоков, В.Ф. Козельцева, Н.Н. Кузнецова // Труды Гидрометцентра России. – 2008. – Вып. 342. – С. 23-36.
21. Palmer W.C. Meteorological droughts / W.C. Palmer. – U.S. Department of Commerce Weather Bureau, 1965. – Research Paper 45. – 58 p.
22. Dai A. A global dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870-2002: relationship with soil moisture and effects of surface warming / A. Dai, K. E. Trenberth, T. Qian // J. of Hydrometeorology. – 2004. – Vol. 5. – P. 1117-1130.
23. Wells N. A self-calibrating Palmer Drought Severity Index / N. Wells, S. Goddard, M.J. Hayes // J. of Climate. 2004. – Vol. 17. – P. 2335-2351.
24. Alley W.M. Palmer Drought Severity Index: Limitations and assumptions / W.M. Alley // J. of Climate Appl. Meteor. – 1984. – Vol. 23. – P. 1100-1109.
25. Thornthwaite C.W. An approach toward a rational classification of climate / C.W. Thornthwaite // Geogr. Review. – 1948. – Vol. 38. – P. 55-94.
26. Thornthwaite C.W. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance / C.W. Thornthwaite, J.R. Mather // Publications in Climatology. – Laboratory of Climatology, Drexel Institute of Technology, Centerton, New Jersey, USA, 1957. – No. 10 (3). – P. 183 – 311.
27. Penman H.L. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass / H.L. Penman // Proc. R. Soc. London., Ser. A. – 1948. – Vol. 193. – P.120-145.
28. Dai A. Characteristics and trends in various forms of the Palmer Drought Severity Index (PDSI) during 1900-2008 / A. Dai // J. Geophys. Res. – 2011. – Vol. 116. – No. D12. DOI: 10.1029/2010JD015541.
29. Cherenkova E.A. Summer drought 2010 in the European Russia / E.A. Cherenkova, N.K. Kononova, N.R. Muratova // Geography, Environmental, Sustainability. – 2013. – № 1 (6). – P. 55-65.
30. Хохлов В.М. Регіональні особливості розподілу посух в Україні / В.М. Хохлов, Г.О. Боровська, Г.В. Хоменко, Т.В. Шараєва // Український гідрометеорологічний журнал. – 2011. – № 9. – С. 73-78.

31. Черенкова Е.А. Засухи в Украине в ситуации влияния квазидвухлетней цикличности глобальных атмосферных процессов / Е.А. Черенкова // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2014. – Том 10. – Вып. 1. – С. 938-942.
32. WMO (2009). Experts agree on a universal drought index to cope with climate risk [Электронный ресурс] // Press Release. – 2009. – No. 872. – Режим доступа: [http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press\\_releases/pr\\_872\\_en.html](http://www.wmo.int/pages/mediacentre/press_releases/pr_872_en.html).
33. McKee T.B. The relationship of drought frequency and duration to time scales / T.B. McKee, N.J. Doesken, J. Kliest // Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. – Anaheim, USA, 1993. – P. 179-184.
34. Lloyd-Hughes B. A drought climatology for Europe / B. Lloyd-Hughes, M.A. Saunders // Int. J. Climatology. – 2002. – Vol. 22, No. 13. – P. 1571-1592.
35. Хохлов В.М. Просторово-часовий розподіл засух на території України в умовах зміни клімату / В.М. Хохлов // Український гідрометеорологічний журнал. – 2011. – № 8. – С. 38-43.
36. Vicente-Serrano S.M. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index / S.M. Vicente-Serrano, S. Beguería, J.I. López-Moreno // J. of Climate. – 2010. – Vol. 23, No. 7. – P. 1696–1718.
37. Vicente-Serrano S.M. A new global 0.5° gridded dataset (1901-2006) of a multiscalar drought index: comparison with current drought index datasets based on the Palmer Drought Severity Index / S.M. Vicente-Serrano, S. Beguería, J.I. López-Moreno [et al.] // J. of Hydrometeorology. – 2010. – Vol. 11. – P. 1033-1043.
38. Abramopoulos F. Improved ground hydrology calculations for global climate models (GCMs): Soil water movement and evapotranspiration / F. Abramopoulos, C. Rosenzweig, B. Choudhury // J. of Climate. – 1988. – Vol.1. – P. 921–941.
39. Abramowitz M. Handbook of Mathematical Functions / M. Abramowitz, I.A. Stegun. – New York: Dover Publications, 1965. – 496 p.



40. Хохлов В.М. Просторово-часова мінливість посух в Східноєвропейському секторі в умовах глобальних змін клімату / В.М. Хохлов, Н.С. Єрмоленко // Український гідрометеорологічний журнал. – 2012. – № 11. – С. 128-134.
41. Лобода Н.С. Шляхи визначення можливої гідрологічної посухи за метеорологічними даними в умовах змін клімату для річок північно-західного Причорномор'я / Н.С. Лобода, Ю.В. Божок // Геополітика и екогеодинамика регионов. – 2014. – Том 10. – Вып. 1. – С. 281-289.
42. Хохлов В.М. Про зв'язок середнього річного стоку р. Південний Буг з посухами в період 1951–2010 рр. / В.М. Хохлов, Н.С. Єрмоленко // Вісник ОДЕКУ. – 2013. – Вип.16. – С. 51-59.
43. Semenova I. On use of drought indices in modeling hydrological processes / I. Semenova, V. Ovcharuk, J. Shakhirzanova // Conference Proceedings SGEM 2014. Geoconference on Water Resources: Hydrology and Water Resources, 17-26 June 2014. – Albena, 2014. – Vol. 1. – P. 503-510. DOI: 10.5593/SGEM2014/B31/S12.065.
44. Кошеленко И.В. Вклад отдельных физических факторов в формирование засух / И.В. Кошеленко, В.А. Волеваха // Труды УкрНИГМИ. – 1971. – Вып. 101. – С. 82-96.
45. Розова К.С. Бездошові періоди на Україні / К.С. Розова. – Київ: Вид-во Української академії с.-г. наук, 1961. – 70 с.
46. Розова К.С. О продолжительности бездождевых периодов на Украине / К.С. Розова // Труды УкрНИГМИ. – 1962. – Вып. 33. – С. 25-29.
47. Семенова І.Г. Регіональна циркуляція атмосфери та умови виникнення морських бризів на північному узбережжі Чорного моря / І.Г. Семенова // Вісник ОДЕКУ. – 2011. – Вип. 12. – С. 113-119.
48. Semenova I.G. Droughts and their relationship with some phases of the streamflow regime for Ukrainian rivers / I.G. Semenova, V.A. Ovcharuk, A.V. Traskova // European Sciences review. – 2015. – No 1-2. – P. 8-10.
49. Мартазинова В.Ф. Изменения крупномасштабной атмосферной циркуляции воздуха на протяжении XX века и ее влияние на погодные

- условия и региональную циркуляцию воздуха в Украине / В.Ф. Мартазинова, Е.К. Иванова, Д.Ю. Чайка // Геофизический журнал. – 2006. – Т. 28, № 1. – С. 51-60.
50. Тимофеев В.Є. Деталізація багаторічної зміни атмосферних опадів у літній сезон / В.Є. Тимофеев, О.Г. Татарчук, О.А. Щеглов // Вісник Київського націон. унів-ту ім. Тараса Шевченка. Серія Географія. – 2012. – Вип. 60. – С. 30-33.
51. Багров Н.А. Статистическая теория распознавания в метеорологии / Н.А. Багров // Труды ГМЦ СССР. – 1983. – Вып. 244. – С. 51-62.
52. Багров Н.А. О некоторых вопросах подыскания аналога для данного образа / Н.А. Багров // Труды ГМЦ СССР. – 1973. – Вып. 106. – С. 78-104.
53. Багров Н.А. О принципе аналогичности и его использовании в практической работе / Н.А. Багров // Труды ЦИП. – 1964. – Вып. 132. – С. 41-47.
54. Мартазинова В.Ф. Атмосферная циркуляция южной полярной области и климат Антарктического полуострова / В.Ф. Мартазинова, В.Е. Тимофеев, Е.К. Иванова. – К.: АБЕРС, 2010. – 92 с.
55. Martazinova V.F. The classification of synoptic patterns by method of analogs / V.F. Martazinova // J. Environ. Sci. Eng. – 2005. – Vol. 7. – P. 61-65.
56. Семёнова И.Г. Характеристика засушливых условий на Украине в конце XX – начале XXI столетия / И.Г. Семёнова // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. – 2014. – Вып. 1 – С. 20-29.
57. Переведенцев Ю.П. Агроклиматические ресурсы Ульяновской области и их влияние на урожайность зерновых культур / Ю.П. Переведенцев, Р.Б. Шарипова, Н.А. Важнова // Вестник Удмуртского университета. Сер. Биология. Науки о Земле. – 2012. – Вып. 2. – С. 120-126.
58. Пасов В.М. Изменчивость урожаев и оценка ожидаемой продуктивности зерновых культур / В.М. Пасов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1986. – 152 с.
59. Полевой А.Н. Теория и расчет продуктивности сельскохозяйственных культур / А.Н. Полевой. – Л.: Гидрометеоиздат, 1983. – 175 с.

60. Семёнова И.Г. Оценка пространственно-временного распределения засух на Украине в вегетационный период / Семёнова И.Г. // Труды ГГО им. А.И. Воейкова. – 2014. – Вып. 571. – С. 134-146.
61. Мохов И.И. Аномальное лето 2010 г. в контексте общих изменений климата и его аномалий / И.И. Мохов // Анализ условий аномальной погоды на территории России летом 2010 года. – М.: Триада Лтд., 2011. – С. 41-47.
62. Nakicenovic N., Swart R. Special report on emissions scenarios / N. Nakicenovic, R. Swart. – Cambridge: Cambridge University Press, 2000. – 599 p.
63. МГЭИК, 2007. Изменение климата, 2007 г.: Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Четвертый доклад об оценке Межправительственной группы экспертов по изменению климата / Под ред. С. Соломон, Д. Квин, М. Маннинг, З. Чен [и др.]. – Cambridge: Cambridge University Press, 2007. – 996 с.
64. Гопченко Є.Д. Науково-методичні підходи до врахування глобальних змін клімату при розрахунках максимального стоку річок / Є.Д. Гопченко, В.А. Овчарук, І.Г. Семенова // Вісник ОДЕКУ. – 2012. – Вип. 14. – С. 141-150.
65. Tebaldi C. Going to the extremes: An intercomparison of model-simulated historical and future changes in extreme events / C. Tebaldi, K. Hayhoe, J. Arblaster, G. Meehl // Climatic Change. – 2006. – Vol. 79 (3-4). – P. 185-211.
66. Burke E.J. Modeling the recent evolution of global drought and projections for the twenty-first century with the Hadley centre climate model / E.J. Burke, S.J. Brown, N. Christidis // J. of Hydrometeorology. – 2006. – Vol. 7 (5). – P. 1113-1125.
67. Li Y. Climate change and drought: a risk assessment of crop-yield impacts / Y. Li, W. Ye, M. Wang, X. Yan // Climate Research. – 2009. – Vol. 39 (1). – P. 31-46.
68. IPCC (2012). Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation // A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change / C. Field, V. Barros, T. Stocker,

- D. Qin, D. Dokken [et al.], eds. - Cambridge: Cambridge University Press, 2012. – 582 p.
69. Dai A. Drought under global warming: a review / A. Dai // *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*. – 2011. – Vol. 2 (1). – P. 45-65.
70. Sheffield J. Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations / J. Sheffield, E. Wood // *Climate Dynamics*. – 2008. – Vol. 31(1). – P. 79-105.
71. Kundzewicz Z. Precipitation extremes in the changing climate of Europe / Z. Kundzewicz, M. Radziejewski, I. Pinskiwar // *Climate Research*. – 2006. – Vol. 31 (1). – P. 51-58.
72. Maracchi G. Impacts of present and future climate variability on agriculture and forestry in the temperate regions: Europe / G. Maracchi, O. Sirotenko, M. Bindi // *Climatic Change*. – 2005. – Vol. 70 (1-2). – P. 117-135.
73. Kysel'ý J. Climate change scenarios of precipitation extremes in Central Europe from ENSEMBLES regional climate models / J. Kysel'ý, L. Ga'al, R. Beranov'a, E. Plavcov'a // *Theoretical and Applied Climatology*. – 2010. – Vol. 104 (3-4). – P. 529-542.
74. Овчарук В.А. Використання моделі граничної інтенсивності для оцінки впливу глобальних змін клімату на максимальний стік весняного водопілля в басейні Дністра / В.А. Овчарук, Г.О. Боровська, А.В. Траскова, І.Г. Семенова // *Географія та туризм*. – 2014. – Вип. 31. – С. 178-189.
75. МГЭИК, 2013 г. [Электронный ресурс]: Изменение климата, 2013 г.: Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата / Под ред. Т.Ф. Стокер [и др.]. – Режим доступа: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/index.shtml>.
76. Hurk B., van den. Assessing the reliability of climate models, CMIP5 / B. van den Hurk, P. Braconnot, V. Eyring, P. Friedlingstein [et al.] // *Climate Science for Serving Society: Research, Modeling and Prediction Priorities* / G.R. Asrar,

- J.W. Hurrell eds. – Springer Science+Business Media Dordrecht, 2013. – P. 237-248.
77. Tebaldi C. Quantifying uncertainty in projections of regional climate change: A bayesian approach to the analysis of multimodel ensembles / C. Tebaldi, R.L. Smith, D. Nychka, L.O. Mearns // *J. of Climate*. – 2005. – Vol. 18(10). – P. 1524-1540.
78. Valle D. The importance of multimodel projections to assess uncertainty in projections from simulation models / D. Valle, C. Staudhammer, W. Cropper, P. van Gardingen // *Ecological Applications*. – 2009. – Vol. 19(7). – P. 1680-1692.
79. Семёнова И.Г. Оценка качества прогнозов метеорологических величин по модели WRF для Украины / И.Г. Семёнова, Е.С. Екимов, М.Б. Мишина // *Метеорологія, кліматологія та гідрологія*. – 2010. – № 51. – С. 27-36.
80. Knutti R. Challenges in combining projections from multiple climate models / R. Knutti, R. Furrer, C. Tebaldi, J. Cermak, G. Meehl // *J. of Climate*. – 2010. – Vol. 23 (10). – P. 2739-2758.
81. Семенова І.Г. Просторово-часовий розподіл посух в Україні в умовах майбутньої зміни клімату / І.Г. Семенова // *Фізична географія та геоморфологія*. – 2015. – Вип. 1 (77). – С. 144-151.
82. Черенкова Е.А. Связь опасных атмосферных засух в Европейской России в XX веке с макроциркуляционными процессами / Е.А. Черенкова, Н.К. Кононова // *Известия РАН. Сер. Географическая*. – 2009. – № 1. – С. 73-82.
83. Гирс А.А. Методы долгосрочных прогнозов погоды / А.А. Гирс, К.В. Кондратович. – Л.: Гидрометеиздат, 1978. – 342 с.
84. Кошеленко Н.В. Некоторые особенности циркуляции атмосферы при засухах на Украине / Н.В. Кошеленко, Ж.К. Гусак, Г.В. Миронченко // *Труды УкрНИГМИ*. – 1979. – Вып. 176. – С. 50-61.
85. Сазонов Б.И. Суровые зимы и засухи / Б.И. Сазонов. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 240 с.

86. Сазонов Б.И. Высотные барические образования и солнечная активность / Б.И. Сазонов. – Л.: Гидрометеиздат, 1964. – 131 с.
87. Кац А.Л. Сезонные изменения общей циркуляции атмосферы и долгосрочные прогнозы / А.Л. Кац. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 270 с.
88. Івус Г.П. Роль гідродинамічної нестійкості атмосфери в процесах відсіченого циклогенезу влітку над Україною / Г.П. Івус, І.Г. Семенова, І.А. Ковальков // Вісник ОДЕКУ. – 2013. – Вип. 16. – С. 60-66.
89. Семёнова И.Г. Использование термического фронтального параметра для моделирования бароклинических зон в процессах циклогенеза / И.Г. Семёнова, Г.П. Івус // Наукові праці УкрНДГМІ. – 2011. – Вип. 261. – С. 56-71.
90. Семёнова И.Г. Циркуляционные условия атмосферы в период катастрофических летних паводков на Дунае / И.Г. Семёнова // Вісник ОДЕКУ. – 2008. – Вип. 6. – С. 103-109.
91. Кудрянь А.П. Некоторые особенности циркуляций атмосферы, определяющих осадки на юге Украины / Кудрянь А.П. // Метеорология, климатология и гидрология. – 1970. – Вып. 6. – С. 125-129.
92. Кудрянь А.П. Южные циклоны: современное состояние вопроса и проблемы / Кудрянь А.П. // Обзор ВНИИГМИ-МЦД. – 1981. – Вып. 7. – 37 с.
93. Мартазинова В.Ф. Крупномасштабная атмосферная циркуляция XX столетия, ее изменения и современное состояние / В.Ф. Мартазинова, Т.А. Свердлик // Труды УкрНИГМИ. – 1998. – Вып.246. – С. 21-27.
94. Мартазинова В.Ф. Атмосферная циркуляция, формирующая засушливые условия на территории Украины в конце XX столетия / В.Ф. Мартазинова, Т.А. Сологуб // Наук. праці УкрНДГМІ. – 2000. – Вип.248. – С. 36-47.
95. Дроздов О.А. Многолетние циклические колебания атмосферных осадков на территории СССР / О.А. Дроздов, А.С. Григорьева. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 157 с.
96. Русов В.Д. Вплив Північноатлантичної осциляції на часовий розподіл опадів: метод вейвлет-розкладання / В.Д. Русов, О.В. Глушков,

97. Семёнова И.Г. Колебания в поле давления в Атлантико-Европейском секторе за период 1980-2002 гг. / И.Г. Семёнова // Метеорологія, кліматологія і гідрологія. – 2004. – Вип. 48. – С. 35-41.
98. Покровская Т.В. Синоптико-климатологические и гелиогеофизические долгосрочные прогнозы погоды / Т.В. Покровская. – Л.: Гидрометеиздат, 1969. – 253 с.
99. Хайруллина Г.Р. Квазидвухлетние колебания в атмосфере Земли. Обзор: наблюдение и механизмы формирования / Г.Р. Хайруллина, Н.М. Астафьева. – М.: ИКИ РАН, 2011. – 60 с.
100. Baldwin M.P. The Quasi-Biennial Oscillation / M.P. Baldwin, L.J. Gray, T.J. Dunkerton, K. Hamilton [et al.] // *Reviews of Geophys.* – 2001. – Vol. 39. – P. 179-229.
101. Колосков П.И. Климатический фактор сельского хозяйства и агроклиматическое районирование / П.И. Колосков. – Л.: Гидрометеиздат, 1971. – 328 с.
102. Пасов В.М. О двухлетней цикличности урожаев зерновых культур / В.М. Пасов // Метеорология и гидрология. – 1974. – №11. – С. 62-71.
103. Cherenkova E. Drought and grain crop yields over the East European Plain under influence of quasibiennial oscillation of global atmospheric processes / E. Cherenkova, I. Semenova, M. Bardin, A.N. Zolotokrylin // *International Journal of Atmospheric Sciences.* – 2015. – Vol. 2015, Article ID 932474. – 11 pages. DOI:10.1155/2015/932474.
104. Синоптико-климатическая характеристика процессов блокирования в атмосфере. Обзорная информация // Труды ВИИГМИ-МЦД / Под ред. Н.А. Иванова, Л.В. Гришкина. – 1989. – Вып. 2. – 53 с.
105. Шакина Н.П. Блокирующие антициклоны: современное состояние исследований и прогнозирования / Н.П. Шакина, А.Р. Иванова // Метеорология и гидрология. – 2010. – № 11. – С. 5-18.

106. Обухов А.М. Динамические условия возникновения засух и других крупномасштабных погодных аномалий / А.М. Обухов, М.В. Курганский, М.С. Татарская // *Метеорология и гидрология*. – 1984. – № 10. – С. 5-13
107. Lejenas H. Characteristics of Northern hemisphere blocking as determined from a long-time series of observational data / H. Lejenas, H. Okland // *Tellus*. – 1983. – Vol. 35A. – N 5. – P. 350-362.
108. Tibaldi S. On the operational predictability of blocking / S. Tibaldi, F. Monteni // *Tellus*. – 1990. – Vol. 42A. – P. 343-365.
109. Barriopedro D. Climatology of Northern hemisphere blocking / D. Barriopedro, R. Garcia-Herrera, A.R. Lupo, E. Hernandez // *J. of Climate*. – Vol. 19. – P. 1042-1063.
110. Хохлов В.Н. Повторяемость блокирующих ситуаций над Европой в начале 21-го века / В.Н. Хохлов, А.В. Романова // *Метеорологія, кліматологія та гідрологія*. – 2005. – Вип. 49. – С. 82-87.
111. Недострелова Л.В. Пространственно-временное распределение блокирующих антициклонов / Л.В. Недострелова, В.Н. Хохлов // *Метеорологія, кліматологія та гідрологія*. – 2010. – Вип. 51. – С. 36-42.
112. Черенкова Е.А. Анализ опасных атмосферных засух 1972 и 2010 гг. и макроциркуляционных условий их формирования на территории Европейской части России / Е.А. Черенкова, Н.К. Кононова // *Труды ГГО им. А.И. Воейкова*. – 2012. – Вып. 565. – С. 165-187.
113. Кононова Н.К. Особенности циркуляции атмосферы Северного полушария в конце XX – начале XXI века и их отражение в климате / Н.К. Кононова // *Сложные системы*. – 2014. – № 2 (11). – С. 11-35.
114. Вангенгейм Г.Я. Процессы блокирования зональных течений и их роль в режиме общей циркуляции атмосферы / Г.Я. Вангенгейм // *Труды Всесоюзн. научн. метеор. совещания. Т. III*. – Л.: Гидрометеиздат, 1963. – С. 3-15.



115. Волеваха В.А. Анализ блокирующих процессов, приводящих к засушливым явлениям на Украине / В.А. Волеваха, И.В. Кошеленко // Труды УкрНИГМИ. – 1969. – Вып. 83. – С. 50-60.
116. Lejenas H. A comparative study of Southern Hemisphere blocking during global weather experiment / H. Lejenas // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. – 1987. – Vol. 113. – P. 181-188.
117. Пальмен Э., Ньютон Ч. Циркуляционные системы атмосферы / Э. Пальмен, Ч. Ньютон; пер. с англ. – Л.: Гидрометеиздат, 1973. – 615 с.
118. Семёнова И.Г. Роль процессов блокирования в формировании засух на Украине / И.Г. Семёнова // Труды ГГО им. А.И. Воейкова. – 2013. – Вып. 569. – С. 124-136.
119. Semenova I.G. Regional atmospheric blocking in the drought periods in Ukraine / I.G. Semenova // Journal of Earth Science and Engineering. – 2013. – Vol. 3 (5). – P. 341-348.
120. Школьный Є.П. Обробка та аналіз гідрометеорологічної інформації: підручник / Є.П. Школьний, І.Д. Лоева, Л.Д. Гончарові; під ред. Є.П. Школьного. – Одеса : Міносвіти України, 1999. – 600 с.
121. Руководство по краткосрочным прогнозам погоды. Часть II. Вып. 1. – Л.: Гидрометеориздат, 1987. – 298 с.
122. Семенова І.Г. Регіональна синоптика: Конспект лекцій / І.Г. Семенова. – Одеса: ОДЕКУ, 2003. – 62 с.
123. Семёнова И.Г. Термические и динамические условия развития черноморской депрессии / И.Г. Семёнова // Вестник Гидрометцентра Черного и Азовского морей. – 2008. – № 1 (5). – С. 42-47.
124. Семёнова И.Г. Термические и динамические характеристики ныряющих циклонов, влияющих на погодные условия Украины / И.Г. Семёнова // Метеорология, климатология и гидрология. – 1997. – Вып. 34. – С. 21-25.

125. Богатырь Л.Ф. Распределение осадков по территории Украины при прохождении циклонов различных траекторий / Л.Ф. Богатырь // Труды УкрНИГМИ. – 1957. – Вып. 7. – С. 37-49.
126. Семёнова И.Г. Метеорологические и синоптические условия засухи в Украине осенью 2011 г. / И.Г. Семёнова // Український гідрометеорологічний журнал. – 2012. – Вип. 10. – С. 58-64.
127. Дзердзеевский Б.Л. Циркуляционные механизмы в атмосфере Северного полушария в XX веке / Б.Л. Дзердзеевский. – М: Изд-во Института географии АН СССР, 1970. – 176 с.
128. Кононова Н.К. Классификация циркуляционных механизмов Северного полушария по Б.Л. Дзердзеевскому / Н.К. Кононова. – М.: Воентехиниздат, 2009. – 372 с.
129. Кононова Н.К. Циркуляция атмосферы в Европейском секторе Северного полушария в XXI веке и колебания температуры в Крыму / Н.К. Кононова // Геополитика и экогеодинамика регионов. – 2014. – Т. 10. – Вып. 1. – С. 633-639.
130. Лоренц Э.Н. Природа и теория общей циркуляции атмосферы / Э.Н. Лоренц; пер. с англ. – Л.: Гидрометеиздат, 1970. – 259 с.
131. Lorenz E.N. Available potential energy and the maintenance of the general circulation / E.N. Lorenz // Tellus. – 1955. – Vol. 7. – P. 157-167.
132. Хохлов В.Н. Энергетика общей циркуляции атмосферы / В.Н. Хохлов. – Одесса: "ТЭС", 2004. – 134 с.
133. Plumb R.A. A new look at the energy cycle / R.A. Plumb // J. Atmos. Sci. – 1983. – Vol. 40. – P. 1669-1688.
134. Hayashi Y. A modification of the atmospheric energy cycle / Y. Hayashi // J. Atmos. Sci. – 1987. – Vol. 44. – P. 2006-2017.
135. Haimberger L. Implementing convection into Lorenz's global cycle. Part I. Gridscale averaging of the energy equations / L. Haimberger, M. Hantel // Tellus. – 2000. – Vol. 52A. – P. 66-74.

136. Michaelides S.C. Quasi-Lagrangian energetics of an intense Mediterranean cyclone / S.C. Michaelides, N.G. Prezerakos, Y.A. Flocas // Q. J. R. Meteorol. Soc. – 1999. – Vol. 125. – P.139-168.
137. Хохлов В.Н. Энергетический бюджет антициклонов в процессе их эволюции / В.Н. Хохлов // Метеорология, климатология и гидрология. – 1999. – Вып. 38. – С. 47-53.
138. Семенова І.Г. Енергетика і вологовміст „пірнаючих циклонів”: автореф. дис. ...канд. геогр. наук: 11.00.09 / Семенова Інна Георгіївна; Одеський гідрометеор. ін-т. – Одеса, 1998. – 12 с.
139. Семенова І.Г. Енергетичні процеси в атмосфері протягом природно-синоптичних періодів / І.Г. Семенова // Метеорологія, кліматологія і гідрологія. – 2002. – Вип. 46. – С. 54-59.
140. Волеваха В.А. Характеристика циркуляционных условий засушливых периодов 1957, 1963 и 1968 гг. / В.А. Волеваха, И.В. Кошеленко // Труды УкрНИГМИ. – 1970. – Вып. 96. – С. 87-98.
141. Хохлов В.М. Схеми перетворення енергії в блокуючому антициклоні / В.М. Хохлов, Л.В. Недострелова, І.Г. Семенова // Український гідрометеорологічний журнал. – 2014. – Вип. 15. – С.52-58.
142. Семёнова И.Г. Структура адвективных потоков водяного пара в блокирующих системах / И.Г. Семёнова // Вісник ОДЕКУ. – 2005. – Вип. 1. – С. 87-91.
143. Гребень А.С. Анализ основных методик прогнозирования урожайности с помощью данных космического мониторинга, применительно к зерновым культурам степной зоны Украины / А.С. Гребень, И.Г. Красовская // Радіоелектронні і комп'ютерні системи. – 2012. – № 2 (54). – С. 170-180.
144. Калинин Н.А. Технология комплексной оценки фитомассы сельскохозяйственных культур по данным дистанционного зондирования Земли / Н.А. Калинин, С.В. Пьянков, Е.М. Свизов, А.А. Смирнова // Вестник Удмуртского университета. Сер. Биология. Науки о Земле. – 2010. – Вып. 4. – С. 11-18.

145. Антоненко В.С. Метеорологический мониторинг посевов сельскохозяйственных культур в Украине с применением аэрокосмических методов / В.С. Антоненко. – Киев: АртЭК, 2002. – 308 с.
146. Rouse J. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS / J.W. Rouse, R.H. Haas, J.A. Schell, D.W. Deering // Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite - 1 Symposium. – NASA SP-351, 1973. – Vol. 1. – P. 309–317.
147. Karnieli A. Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations / A. Karnieli, N. Agam, R.T. Pinker, M. Anderson [et al.] // J. Climate. – 2010. – Vol. 23. – P. 618-633.
148. 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.
149. Singh R.P. Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India / R.P. Singh, S. Roy, F. Kogan // Int. J. Remote Sensing. – 2003. – Vol. 24, No. 22. – P. 4393-4402.
150. Owrangi M.A. Drought monitoring methodology based on AVHRR images and SPOT vegetation maps / M.A. Owrangi, J. Adamowski, M. Rahnemaei [et al.] // J. of Water Resource and Protection. – 2011. – Vol. 3, No. 5. – Article ID: 4981. – 10 pages. DOI:10.4236/jwarp.2011.35041.
151. Kogan F. Early detection and monitoring droughts from NOAA environmental satellites / F. Kogan, Wei Guo // Use of satellite and in-situ data to improve sustainability: proceedings of the NATO Advanced Research Workshop, Kiev, Ukraine, 9-12 June 2009. – Published by Springer, 2011. – P. 11-18.
152. Семенова І.Г. Використання вегетаційних індексів для моніторингу посух в Україні / І.Г. Семенова // Український гідрометеорологічний журнал. – 2014. – Вип. 14. – С. 43-52.
153. Peled E. Technical note: Comparing and ranking soil-moisture indices performance over Europe, through remote-sensing of vegetation / E. Peled,

- E. Dutra, P. Viterbo, A. Angert // *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* – 2009. – Vol. 6. – P. 6247-6264.
154. Gao B.C. NDWI – a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space / B.C. Gao // *Remote Sensing of Environment.* – 1996. – Vol. 58. – P. 257-266.
155. Delbart N. Determination of phenological dates in boreal regions using normalized difference water index / N. Delbart, L. Kergoat, T. Le Toan [et al.] // *Remote Sensing of Environment.* – 2005. – Vol. 97 (1). – P. 26-38.
156. Семенова І.Г. Моделювання врожайності озимої пшениці в степовій зоні України з використанням вегетаційних індексів / І.Г. Семенова // *Український гідрометеорологічний журнал.* – 2014. – Вип. 15. – С. 117-124.
157. Антоненко В.С. Оценка состояния посевов и прогноз урожайности озимой пшеницы в Украине по данным многоспектральной космической съемки / В.С. Антоненко, Р.В. Гаценко // *Наук. праці УкрНДГМІ.* – 2005. – Вип. 254. – С. 55-71.
158. Иванова С.М. Влияние процессов в нижней и верхней атмосфере на прохождение радиосигналов от космических источников / С.М. Иванова, Г.П. Ивус, И.Г. Семёнова // *Метеорологія, кліматологія і гідрологія.* – 2004. – Вип. 48. – С. 133-139.
159. Клещенко А.Д. К вопросу об использовании спутниковых данных при оперативном агрометобслуживании народного хозяйства / А.Д. Клещенко, О.В. Вирченко // *Труды ВНИИСХМ.* – 1989. – Вып. 25. – С. 3-8.
160. Клещенко А. Д. Динамическая модель продукционного процесса кукурузы с использованием спутниковой информации и методы прогноза урожайности / А.Д. Клещенко, Т.А. Найдина // *Метеорология и гидрология.* – 2012. – № 12. – С. 88-98.
161. Кривобок А.А. Использование многоспектральной спутниковой информации для идентификации посевов сельскохозяйственных культур / А.А. Кривобок // *Наук. праці УкрНДГМІ.* – 2000. – Вип. 248. – С. 190-198.

162. Антоненко В.С. Методические рекомендации по расчету растительной массы и урожая зерна озимой пшеницы / В.С. Антоненко, Н.И. Гойса, Р.В. Гаценко – К.: Укроегидромет, 1990. – 117 с.
163. Dąbrowska-Zielińska K. Monitoring of agricultural drought in Poland using data derived from environmental satellite images / K. Dąbrowska-Zielińska, A. Ciołkosz A., A. Malińska, M. Bartold // *Geoinformation Issues*. – 2011. – Vol. 3, No 1 (3). – P. 87-97.
164. Dąbrowska-Zielińska K. Modelling of crop growth conditions and crop yield in Poland using AVHRR-based indices / K. Dąbrowska-Zielińska, F. Kogan, A. Ciołkosz, [et al.] // *Int. J. Remote Sensing*. – 2002. – Vol. 23, No. 6. – P. 1109-1123.
165. Kogan F. Satellite-based crop production monitoring in Ukraine and regional food security / F. Kogan, T. Adamenko, M. Kulbida // *Use of satellite and in-situ data to improve sustainability. NATO Science for peace and security series C: Environmental Security*. – Springer Science+Business Media B.V., 2011. – P. 99-104.
166. Коган Ф. Сравнительный анализ результатов регрессионных и биофизических моделей в задаче прогнозирования урожайности озимой пшеницы / Ф. Коган, Н.Н. КуССуль, Т.И. Адаменко, С.В. Скакун [и др.] // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. – 2013. – Т. 10. – № 1. – С. 215-227.
167. Колотий А.В. Регрессионные модели прогнозирования урожайности озимой пшеницы в Украине / А.В. Колотий // *Індуктивне моделювання складних систем*. – 2012. – Вип. 4. – С. 92-101.
168. Dąbrowska-Zielińska K. Estimates of yield reduction caused by drought / K. Dąbrowska-Zielińska, A. Ciołkosz, A. Malinska [et al.] // *Remote sensing for science, education, and natural and cultural heritage: proceedings of EARSeL Symposium 2010, UNESCO, Paris (France), 31 May-3 June 2010*. – Paris, 2010. – P. 657-661.

Додаток А  
Аналіз бездощових періодів в Україні у квітні-жовтні 1995-2012 рр.

Таблиця А.1

Повторюваність та сумарна тривалість бездощових періодів по станціях України

Роки	Одеса		Сімферополь		Київ		Харків		Львів		Чернівці		Тернопіль	
	кіль-сть періодів	Сумарна кіль-сть днів	кіль-сть періодів	Сумарна кіль-сть днів	кіль-сть періодів	Сумарна кіль-сть днів	кіль-сть періодів	Сумарна кіль-сть днів	кіль-сть періодів	Сумарна кіль-сть днів	кіль-сть періодів	Сумарна кіль-сть днів	кіль-сть періодів	Сумарна кіль-сть днів
1995	6	113	3	53	6	89	5	66	3	49	2	25	5	73
1996	7	109	3	95	5	61	4	47	5	70	3	40	4	56
1997	5	82	2	32	2	21	3	50	1	16	3	51	3	38
1998	8	111	5	81	4	47	5	94	1	11	3	30	2	21
1999	8	117	6	111	4	62	2	30	3	44	3	46	1	14
2000	6	109	5	119	4	78	6	103	5	74	5	73	5	79
2001	5	93	4	94	5	75	5	68	3	41	3	35	2	32
2002	5	100	4	69	4	68	3	54	4	59	2	34	3	49
2003	6	94	4	95	2	36	5	76	4	53	3	47	4	53
2004	5	61	5	70	6	70	4	51	2	20	4	52	3	44
2005	4	93	7	95	5	53	6	99	3	39	4	47	6	75
2006	4	66	7	112	3	48	5	94	2	37	4	51	4	64
2007	6	85	8	124	2	32	4	57	1	13	2	26	1	15
2008	6	84	6	99	2	37	5	69	3	44	3	39	1	14
2009	5	85	6	137	3	40	4	45	4	61	5	81	3	47
2010	4	69	5	84	4	63	5	62	2	23	1	11	1	10
2011	7	116	5	115	5	81	5	91	5	71	5	89	5	96
2012	7	143	5	116	4	54	5	72	4	58	3	35	5	54
<b>Середнє</b>	<b>5,8</b>	<b>96,1</b>	<b>5,0</b>	<b>94,5</b>	<b>3,9</b>	<b>56,4</b>	<b>4,5</b>	<b>68,2</b>	<b>3,1</b>	<b>43,5</b>	<b>3,2</b>	<b>45,1</b>	<b>3,2</b>	<b>46,3</b>
<b>Мін.</b>	<b>4</b>	<b>61</b>	<b>2</b>	<b>32</b>	<b>2</b>	<b>21</b>	<b>2</b>	<b>30</b>	<b>1</b>	<b>11</b>	<b>1</b>	<b>11</b>	<b>1</b>	<b>10</b>
<b>Макс.</b>	<b>8</b>	<b>143</b>	<b>8</b>	<b>137</b>	<b>6</b>	<b>89</b>	<b>6</b>	<b>103</b>	<b>5</b>	<b>74</b>	<b>5</b>	<b>89</b>	<b>6</b>	<b>96</b>

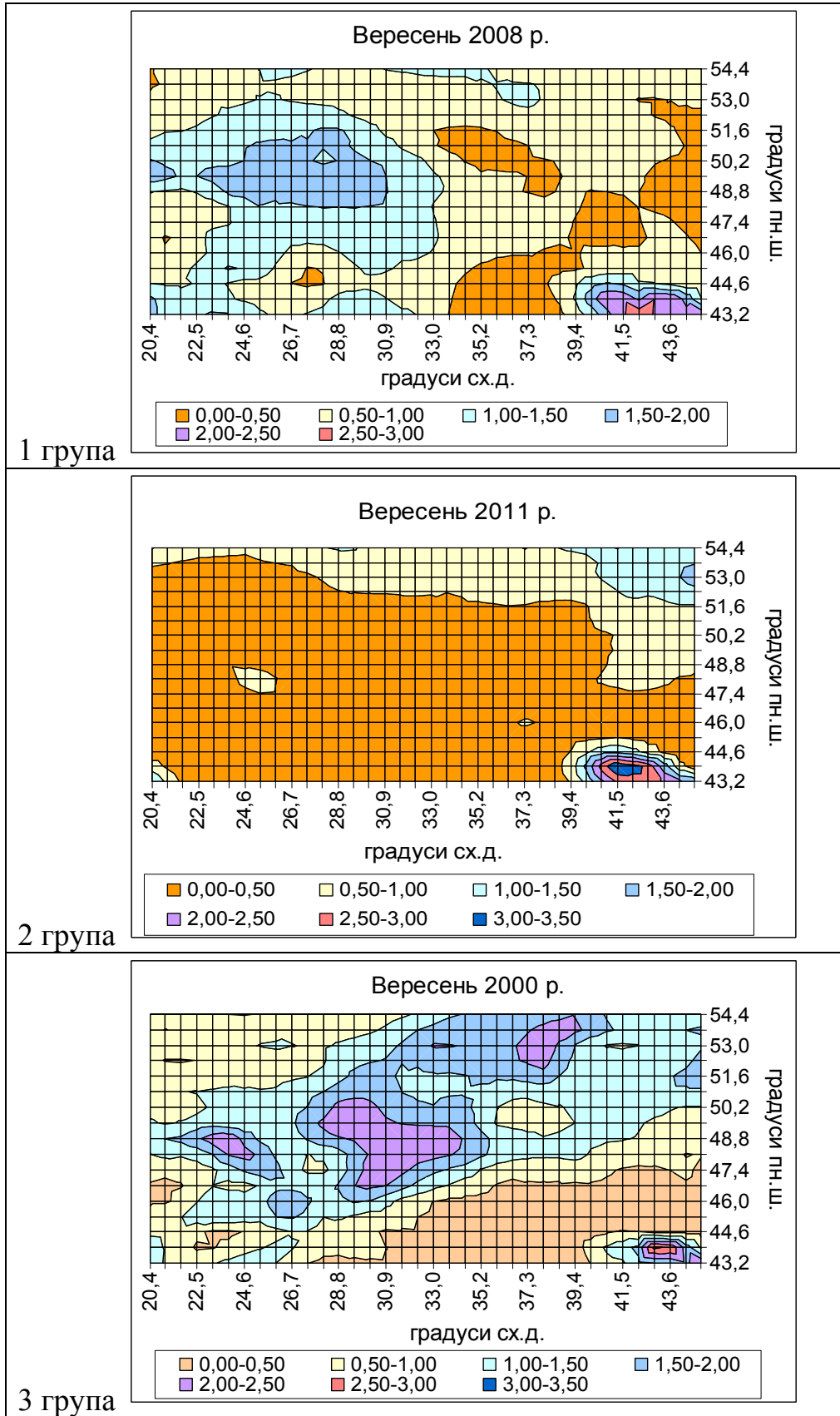
Продовження табл. А.1

Роки	Вінниця		Житомир		Ужгород		Суми		Луганськ		Рівне		Кіровоград	
	кіль-сть періодів	Сумарна кіль-сть Днів	кіль-сть періодів	Сумарна кіль-сть днів	кіль-сть періодів	Сумарна кіль-сть днів	кіль-сть періодів	Сумарна кіль-сть днів	кіль-сть періодів	Сумарна кіль-сть днів	кіль-сть періодів	Сумарна кіль-сть днів	кіль-сть періодів	Сумарна кіль-сть днів
1995	6	82	4	57	3	51	6	72	3	44	3	49	4	74
1996	4	49	5	62	3	47	5	69	5	81	4	50	7	92
1997	2	34	2	34	3	39	3	47	4	60	2	34	3	49
1998	4	47	2	24	2	21	5	74	8	131	4	48	5	78
1999	8	107	1	12	4	49	3	34	8	115	2	33	3	38
2000	3	68	4	73	5	107	4	72	6	86	4	97	6	81
2001	5	67	2	26	4	41	4	63	2	32	3	37	4	76
2002	2	37	2	35	4	57	6	83	4	52	3	50	3	47
2003	5	67	5	67	4	47	3	53	-	-	5	69	5	80
2004	6	67	4	48	1	14	4	46	4	55	2	21	4	51
2005	3	60	5	75	4	62	6	86	3	60	5	64	8	111
2006	2	42	3	42	4	56	3	52	4	61	5	96	4	61
2007	3	41	2	25	2	26	5	63	6	72	3	33	5	68
2008	3	37	5	56	4	55	5	62	6	72	4	58	4	53
2009	3	73	3	62	5	61	5	72	4	62	4	63	3	74
2010	4	66	3	35	3	42	5	64	6	93	1	13	4	67
2011	5	72	3	45	4	59	6	83	7	96	6	96	8	123
2012	6	82	3	40	3	45	4	55	4	111	4	63	6	80
<b>Середнє</b>	<b>4,1</b>	<b>61,0</b>	<b>3,2</b>	<b>45,4</b>	<b>3,4</b>	<b>48,8</b>	<b>4,6</b>	<b>63,9</b>	<b>4,9</b>	<b>75,5</b>	<b>3,6</b>	<b>54,1</b>	<b>4,8</b>	<b>72,4</b>
<b>Мін.</b>	<b>2</b>	<b>34</b>	<b>1</b>	<b>12</b>	<b>1</b>	<b>14</b>	<b>3</b>	<b>34</b>	<b>2</b>	<b>32</b>	<b>1</b>	<b>13</b>	<b>3</b>	<b>38</b>
<b>Макс.</b>	<b>8</b>	<b>107</b>	<b>5</b>	<b>75</b>	<b>5</b>	<b>107</b>	<b>6</b>	<b>86</b>	<b>8</b>	<b>131</b>	<b>6</b>	<b>97</b>	<b>8</b>	<b>123</b>



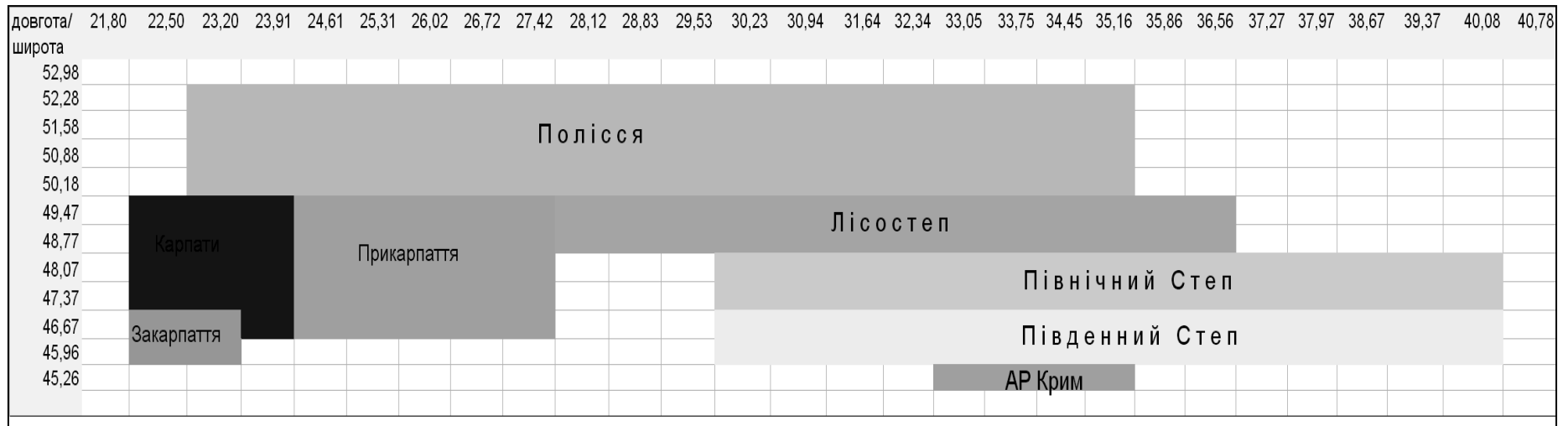
Додаток Б

Приклади полів ГТК, що відносяться до другого класу, у вересні



## Додаток В

### Схема розташування розрахункових областей (згідно агрокліматичних зон України )



## Додаток Г

Характеристики індексів посух по агрокліматичним зонам України за період 1995-2012 рр.

Таблиця Г.1  
Статистичні характеристики індексу Д.А. Педея ( $S_a$ )

Параметр	Місяць	Степ	Лісостеп	Полісся	Карпати	Крим	Середнє по Україні
Середнє значення	Квітень	0,09	0,13	0,17	0,12	0,16	0,13
	Травень	0,30	0,37	0,30	0,26	0,33	0,31
	Червень	0,36	0,38	0,23	0,22	0,37	0,31
	Липень	0,11	0,04	0,06	-0,02	0,15	0,07
	Серпень	0,05	0,14	0,02	-0,10	0,07	0,04
	Вересень	0,00	-0,03	0,15	-0,07	0,08	0,03
	Жовтень	-0,09	0,05	0,18	0,12	-0,02	0,05
Максимальне значення	Квітень	2,07	2,57	2,66	3,69	2,60	2,53
	Травень	3,64	3,81	2,62	3,44	3,15	3,33
	Червень	3,38	2,84	2,51	2,88	2,97	2,39
	Липень	2,40	2,74	2,29	3,67	2,74	2,47
	Серпень	3,59	3,59	2,71	2,09	3,07	2,87
	Вересень	2,27	2,35	2,64	3,20	2,33	2,23
	Жовтень	3,12	2,43	2,84	2,56	3,77	1,81
Стандартне відхилення	Квітень	1,63	1,48	1,38	1,68	1,79	1,39
	Травень	1,75	1,60	1,51	1,41	1,72	1,41
	Червень	1,76	1,61	1,43	1,75	1,55	1,36
	Липень	1,78	1,72	1,62	1,62	1,72	1,42
	Серпень	1,93	1,50	1,45	1,80	1,96	1,43
	Вересень	1,72	1,77	1,72	1,89	1,55	1,61
	Жовтень	1,79	1,71	1,76	1,68	1,87	1,50

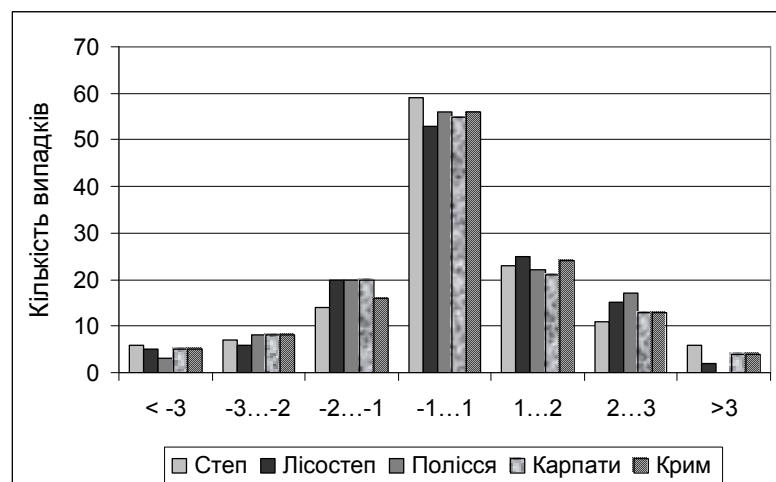


Рис. Г.1. Частотний розподіл індексу  $S_a$ , осередненого по агрокліматичним зонам, за місяці вегетаційного періоду (квітень-жовтень)

## Статистичні характеристики індексу Палмера (sc-PDSI )

Параметр	Місяць	Степ	Лісостеп	Полісся	Середнє по Україні
Середнє значення	Квітень	0,55	-0,40	-0,04	0,04
	Травень	0,33	-0,39	0,01	-0,02
	Червень	0,27	-0,25	-0,02	0,00
	Липень	0,54	-0,27	0,06	0,11
	Серпень	0,71	-0,32	-0,15	0,08
	Вересень	0,62	-0,07	0,05	0,20
	Жовтень	0,63	-0,11	0,11	0,21
Мінімальне значення	Квітень	-1,87	-1,85	-1,40	-1,55
	Травень	-2,20	-2,34	-1,72	-1,49
	Червень	-2,63	-1,87	-2,16	-1,63
	Липень	-2,04	-1,65	-1,28	-1,27
	Серпень	-1,34	-1,54	-1,67	-1,33
	Вересень	-1,34	-1,41	-1,17	-0,96
	Жовтень	-1,38	-2,01	-1,50	-1,02
Стандартне відхилення	Квітень	1,45	0,88	0,72	0,94
	Травень	1,57	0,98	0,73	0,94
	Червень	1,61	0,96	0,78	0,94
	Липень	1,60	0,96	0,82	0,96
	Серпень	1,31	0,82	0,81	0,85
	Вересень	1,44	0,97	0,78	0,93
	Жовтень	1,32	1,06	0,91	0,90

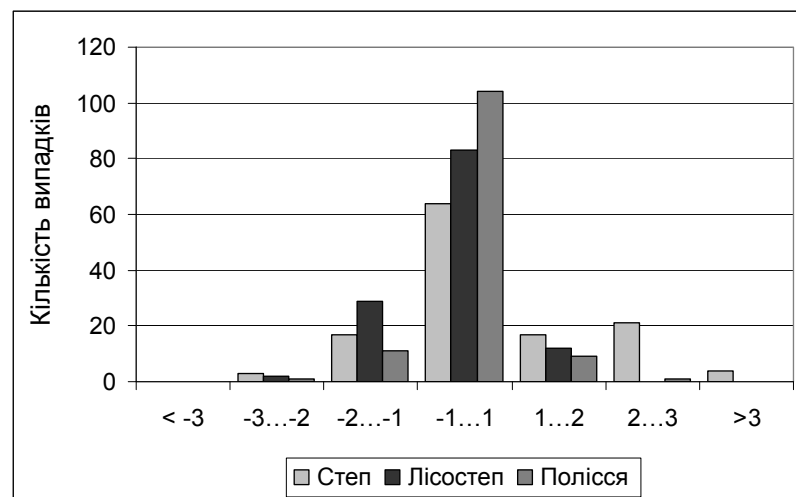


Рис. Г.2. Частотний розподіл індексу sc-PDSI, осередненого по агрокліматичним зонам, за місяці вегетаційного періоду (квітень-жовтень)

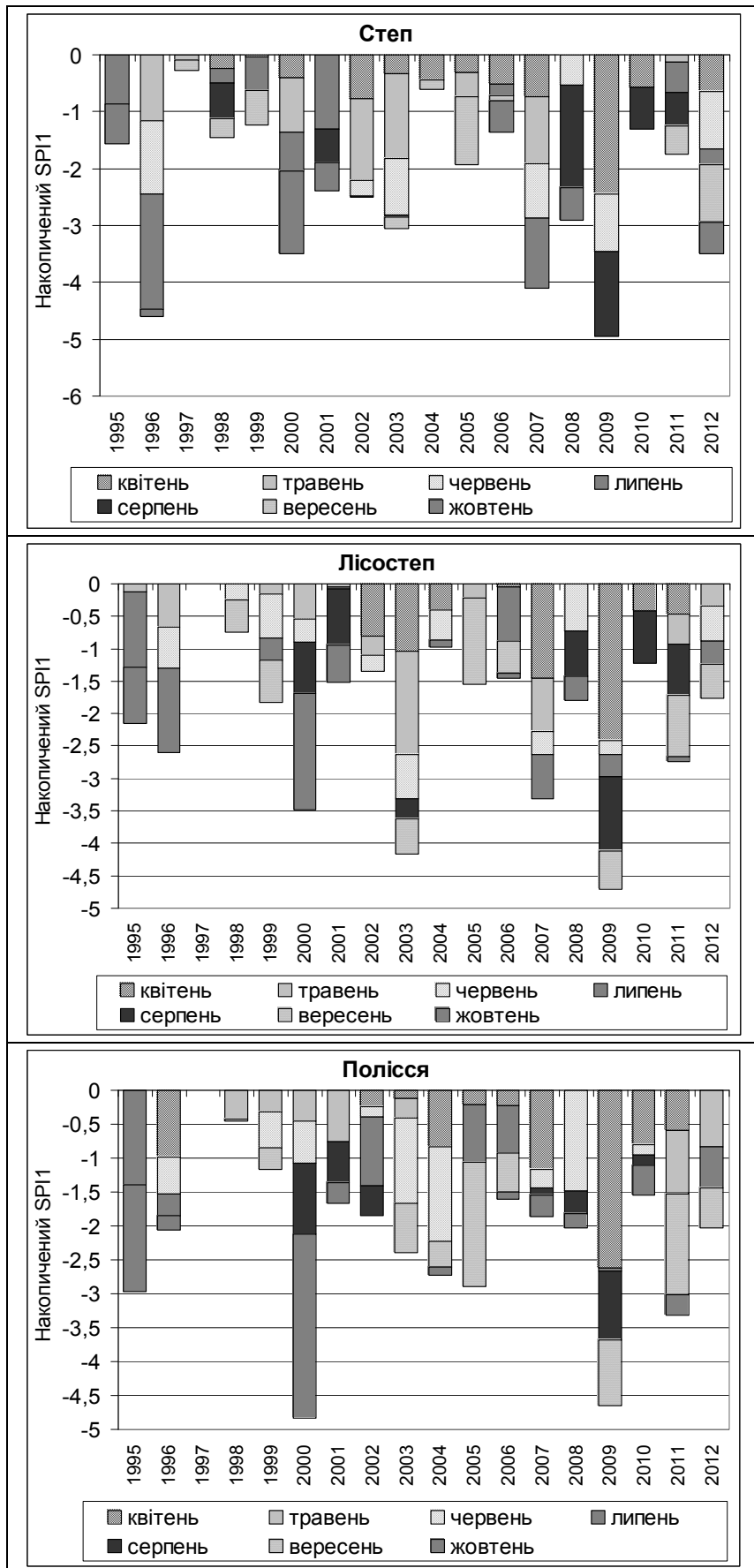


Рис. Г.3. Часовий розподіл накопиченого індексу SPI1 (<math><0</math>) по агрокліматичним зонам України за 1995-2012 рр. [60]

## Додаток Д

## Характеристики коливань індексу блокування ЕСВІ

Таблиця Д.1

Періодичність коливань пентадних ( $T_{\text{пм}}$ ) та місячних ( $T_{\text{м}}$ ) значень ЕСВІ та амплітуда коливань ( $A$ ) по часових відрізках

1990-1995 pp.		1996-2001 pp.		2002-2007 pp.		2008-2012 pp.		1990-2012 pp.	
$T_{\text{пм}}$	$A$	$T_{\text{пм}}$	$A$	$T_{\text{пм}}$	$A$	$T_{\text{пм}}$	$A$	$T_{\text{м}}$	$A$
10,65	0,07	3,19	0,10	10,65	0,08	8,89	0,10	9,71	0,037
3,65	0,07	2,20	0,08	4,28	0,06	2,66	0,09	8,43	0,036
2,83	0,10	1,44	0,07	2,83	0,07	2,23	0,06	6,91	0,043
2,31	0,09	1,17	0,06	2,11	0,06	1,63	0,06	4,59	0,035
1,74	0,07	1,07	0,06	1,81	0,08	1,36	0,08	3,77	0,045
1,58	0,08	0,99	0,07	1,17	0,05	1,20	0,06	3,05	0,049
1,36	0,05	0,93	0,06	0,87	0,05	0,81	0,07	2,87	0,037
								2,43	0,049
								2,18	0,037

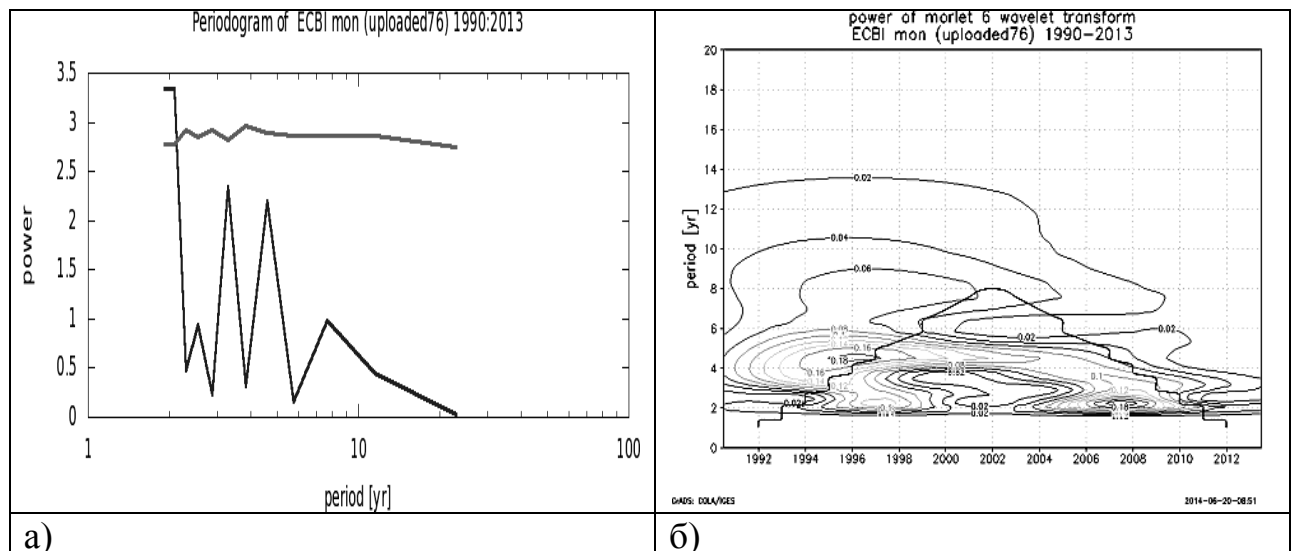


Рис. Д.1. Періодограма (а) та вейлет-перетворення (б) часових коливань індексу ЕСВІ (виконано за допомогою Climate Explorer)

## Додаток Е

Критерії аналогічності  $\rho$ ,  $\eta$  для полів геопотенціальної висоти Н-500 та індекси SPI1, ГТК для випадків посух в Україні за період 1995-2012 рр.

Рік	Місяць	$\rho$	$\eta$	SPI1		ГТК	
				мінімум	зона мінімуму	мінімум	зона мінімуму
2012	9	0,962	0,051	-1,01	Степ	0,15	Степ
2012	8	0,958	0,075	0,36	Лісостеп	0,49	Степ
2012	4	0,958	0,115	-0,65	Степ	0,75	Степ
2011	9	0,960	0,055	-1,49	Полісся	0,21	Лісостеп
2009	9	0,963	0,048	-0,97	Полісся	0,46	Полісся
2009	8	0,960	0,070	-1,50	Степ	0,18	Степ
2009	4	0,959	0,106	-2,62	Полісся	0,14	Полісся
2008	10	0,958	0,052	-0,58	Степ	0,55	Лісостеп
2008	8	0,958	0,067	-1,80	Степ	0,09	Степ
2007	9	0,810	0,049	0,07	Полісся	0,51	Степ
2007	8	0,961	0,073	-0,10	Полісся	0,36	Степ
2007	4	0,957	0,083	-1,46	Лісостеп	0,09	Полісся
2006	9	0,961	0,049	-0,57	Полісся	0,40	Степ
2005	10	0,962	0,048	0,05	Полісся	0,10	Полісся
2005	9	0,961	0,051	-1,84	Полісся	0,14	Лісостеп
2003	5	0,961	0,094	-1,59	Лісостеп	0,23	Степ
2003	4	0,958	0,051	-1,04	Лісостеп	0,49	Степ
2002	8	0,960	0,050	-0,44	Полісся	0,67	Степ
2002	4	0,960	0,102	-0,81	Лісостеп	0,29	Степ
2001	10	0,958	0,051	-0,58	Лісостеп	0,13	Степ
2001	8	0,958	0,072	-0,87	Лісостеп	0,19	Лісостеп
2000	10	0,959	0,060	-2,72	Полісся	0,02	Лісостеп
2000	5	0,958	0,102	-0,96	Степ	0,74	Степ
2000	4	0,959	0,054	-0,41	Степ	0,81	Полісся
1999	9	0,950	0,049	-0,65	Лісостеп	0,30	Лісостеп
1999	8	0,626	0,055	0,25	Лісостеп	0,59	Степ
1996	7	0,960	0,058	-2,30	Степ	0,21	Степ
1996	4	0,626	0,104	-0,98	Полісся	0,36	Полісся

## Додаток Ж

## Характеристики циклонічної та антициклонічної циркуляції над Україною

Таблиця Ж.1

Повторюваність циклонічних полів над Україною у холодні сезони  
1994-2012 рр.

Сезон, роки	Південні циклони	Західні циклони	Північно- західні циклони	Чорно- морська депресія	Улого- вини	Всього
1994-1995	5	0	2	3	10	20
1995-1996	10	4	1	6	5	26
1996-1997	6	4	2	5	12	29
1997-1998	5	1	3	5	7	21
1998-1999	6	1	1	2	7	17
1999-2000	7	1	2	3	7	20
2000-2001	4	6	1	1	5	17
2001-2002	4	3	5	4	6	22
2002-2003	4	4	1	4	4	17
2003-2004	5	3	2	4	5	19
2004-2005	4	6	1	4	5	20
2005-2006	5	2	2	5	5	19
2006-2007	3	1	1	0	6	11
2007-2008	5	0	0	4	7	16
2008-2009	3	3	1	4	3	14
2009-2010	5	1	1	4	3	14
2010-2011	4	1	0	4	7	16
2011-2012	3	1	2	2	6	14
Всього	88	42	28	64	110	332
Середнє	4,9	2,3	1,6	3,6	6,1	18,4



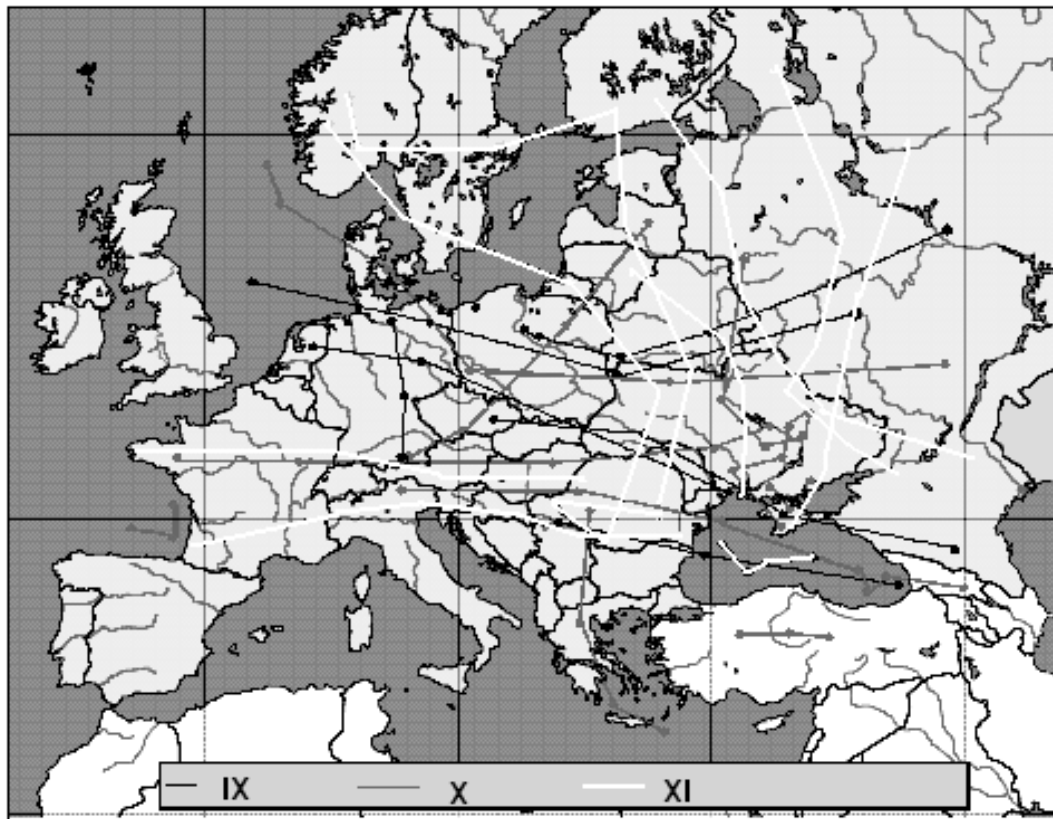


Рис. Ж.1. Карта-схема траєкторій антициклонів за вересень-листопад 2011 року

## Додаток К

## Математичні вирази для визначення перетворень форм енергії

1. Перетворення середньозональної доступної потенціальної енергії ( $P_z$ ) та середньозональної кінетичної енергії ( $K_z$ )

$$\langle P_z - K_z \rangle = - \int_{p_1}^{p_2} \left[ ([T]_{\lambda})_{\varphi} ([\tau]_{\lambda})_{\varphi} \right]_{\lambda\varphi} \frac{R}{gp} dp.$$

2. Перетворення вихрової доступної потенціальної енергії ( $P_e$ ) та вихрової кінетичної енергії ( $K_e$ )

$$\langle P_e - K_e \rangle = - \int_{p_1}^{p_2} \left[ ([T]_{\lambda})_{\varphi} ([\tau]_{\lambda})_{\varphi} \right]_{\lambda\varphi} \frac{R}{gp} dp.$$

3. Перетворення середньозональної ( $P_z$ ) та вихрової ( $P_e$ ) доступної потенціальної енергії

$$\langle P_z - P_e \rangle = - \int_{p_1}^{p_2} \left( \left[ \frac{(T)_{\lambda} (v)_{\lambda}}{a[\sigma]_{\lambda\varphi}} \frac{\partial ([T]_{\lambda})_{\varphi}}{\partial \varphi} \right]_{\lambda\varphi} + \left[ \frac{(T)_{\lambda} (\tau)_{\lambda}}{p^{R/c_p}} \frac{\partial}{\partial p} \left\{ \frac{([T]_{\lambda})_{\varphi} p^{R/c_p}}{[\sigma]_{\lambda\varphi}} \right\} \right]_{\lambda\varphi} \right) dp.$$

4. Перетворення середньозональної ( $K_z$ ) та вихрової ( $K_e$ ) кінетичної енергії

$$\begin{aligned} \langle K_z - K_e \rangle = & - \frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} \left[ (u)_{\lambda} (v)_{\lambda} \frac{\cos \varphi}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left( \frac{[u]_{\lambda}}{\cos \varphi} \right) \right]_{\lambda\varphi} dp - \frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} \left[ \frac{(v)_{\lambda}^2}{a} \frac{\partial [v]_{\lambda}}{\partial \varphi} \right]_{\lambda\varphi} dp - \\ & - \frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} \left[ \frac{\tan \varphi}{a} (u)_{\lambda}^2 [v]_{\lambda} \right]_{\lambda\varphi} dp - \frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} \left[ (u)_{\lambda} (\tau)_{\lambda} \frac{\partial [u]_{\lambda}}{\partial p} \right]_{\lambda\varphi} dp - \frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} \left[ (v)_{\lambda} (\tau)_{\lambda} \frac{\partial [v]_{\lambda}}{\partial p} \right]_{\lambda\varphi} dp. \end{aligned}$$

Умовні позначення у формулах:

$T$  – температура повітря;

$p$  – тиск повітря;

$u, v$  – зональна та меридіональна складові швидкості вітру.

$\tau$  – ізобарична вертикальна швидкість;

$\sigma$  – параметр статичної стійкості (формула 3.12);

$g$  – прискорення вільного падіння;

$c_p$  – питома теплоємність повітря за сталого тиску;

$R$  – газова стала для сухого повітря;

$a$  – радіус Землі;

$\varphi, \lambda$  – широта та довгота.

Додаток Л

Графіки часового ходу енергетичних характеристик атмосфери та індексу блокування ЕСВІ за квітень-червень 1959 р.

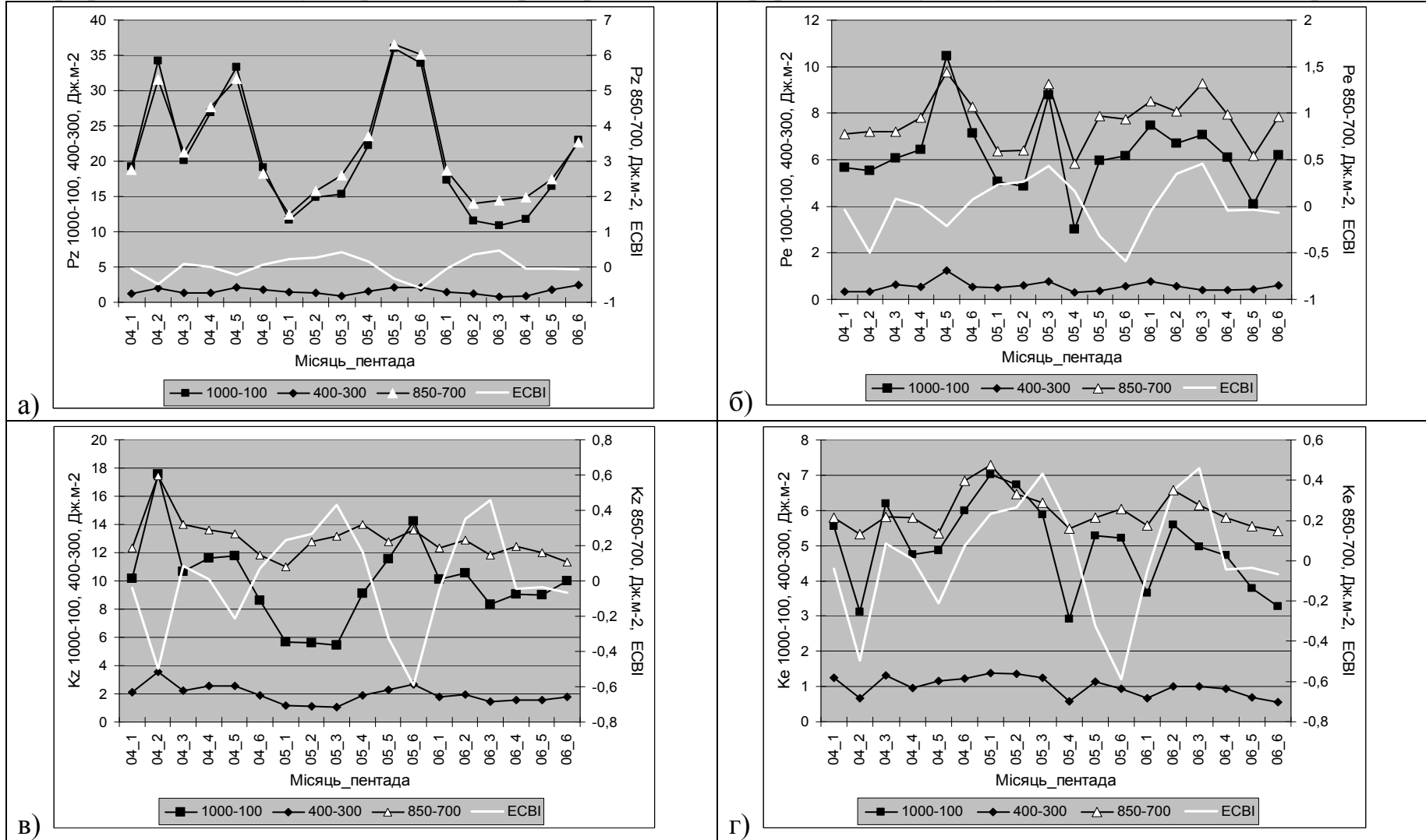


Рис. Л.1. Часовий хід доступної потенціальної енергії ( $10^5$  Дж·м<sup>-2</sup>) зональної  $P_z$  (а) і вихрової  $P_e$  (б), кінетичної енергії ( $10^5$  Дж·м<sup>-2</sup>) зональної  $K_z$  (в) і вихрової  $K_e$  (г) за квітень-червень 1959 р.

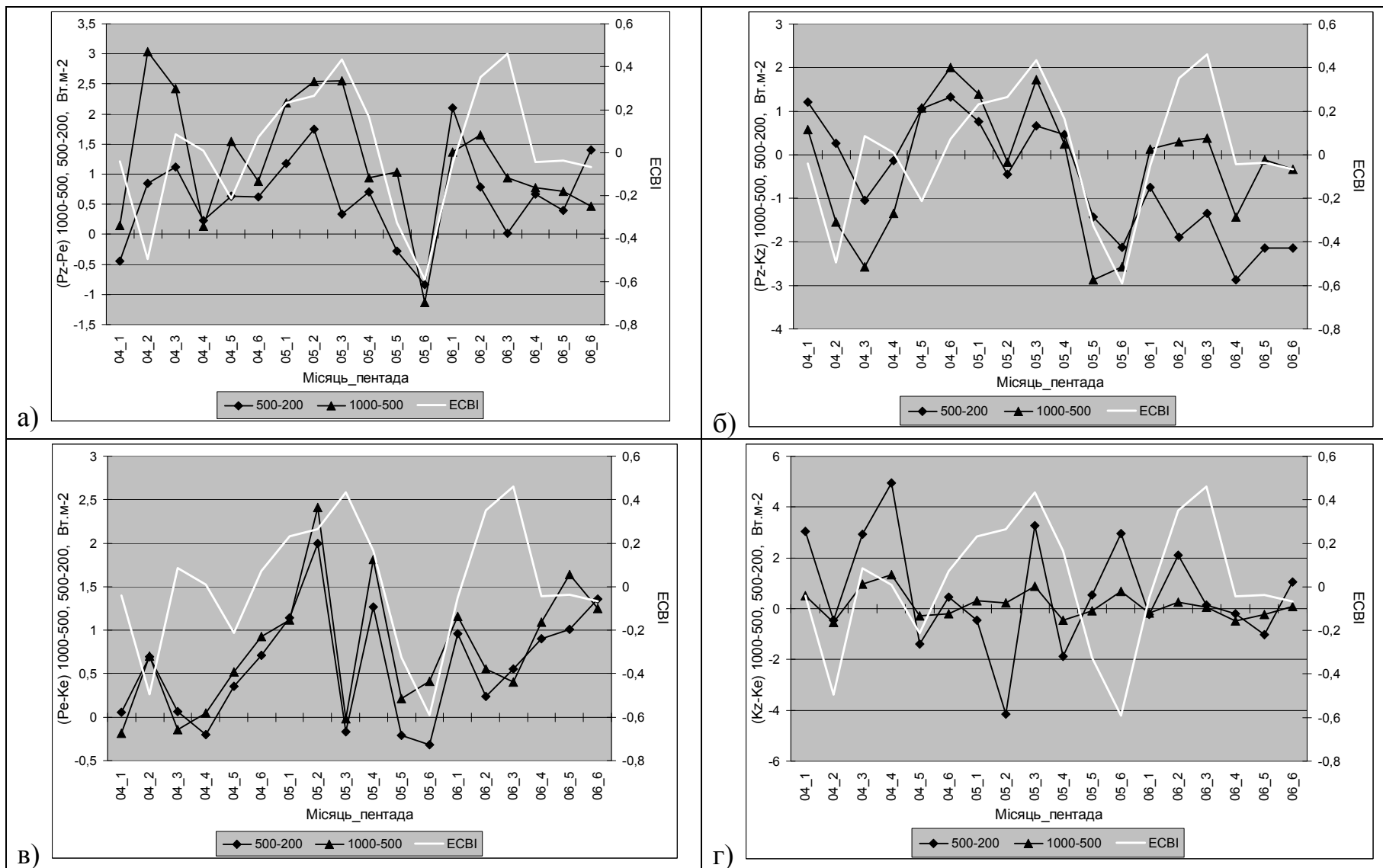


Рис. Л.2. Часовий хід перетворень енергії (Вт·м<sup>-2</sup>): (а) - (P<sub>z</sub>-P<sub>e</sub>); (б) - (P<sub>z</sub>-K<sub>z</sub>); (в) - (P<sub>e</sub>-K<sub>e</sub>); (г) - (K<sub>z</sub>-K<sub>e</sub>) за квітень-червень 1959 р.

Додаток М

Графіки часового ходу енергетичних характеристик атмосфери та індексу блокування ЕСВІ за квітень-червень 1968 р.

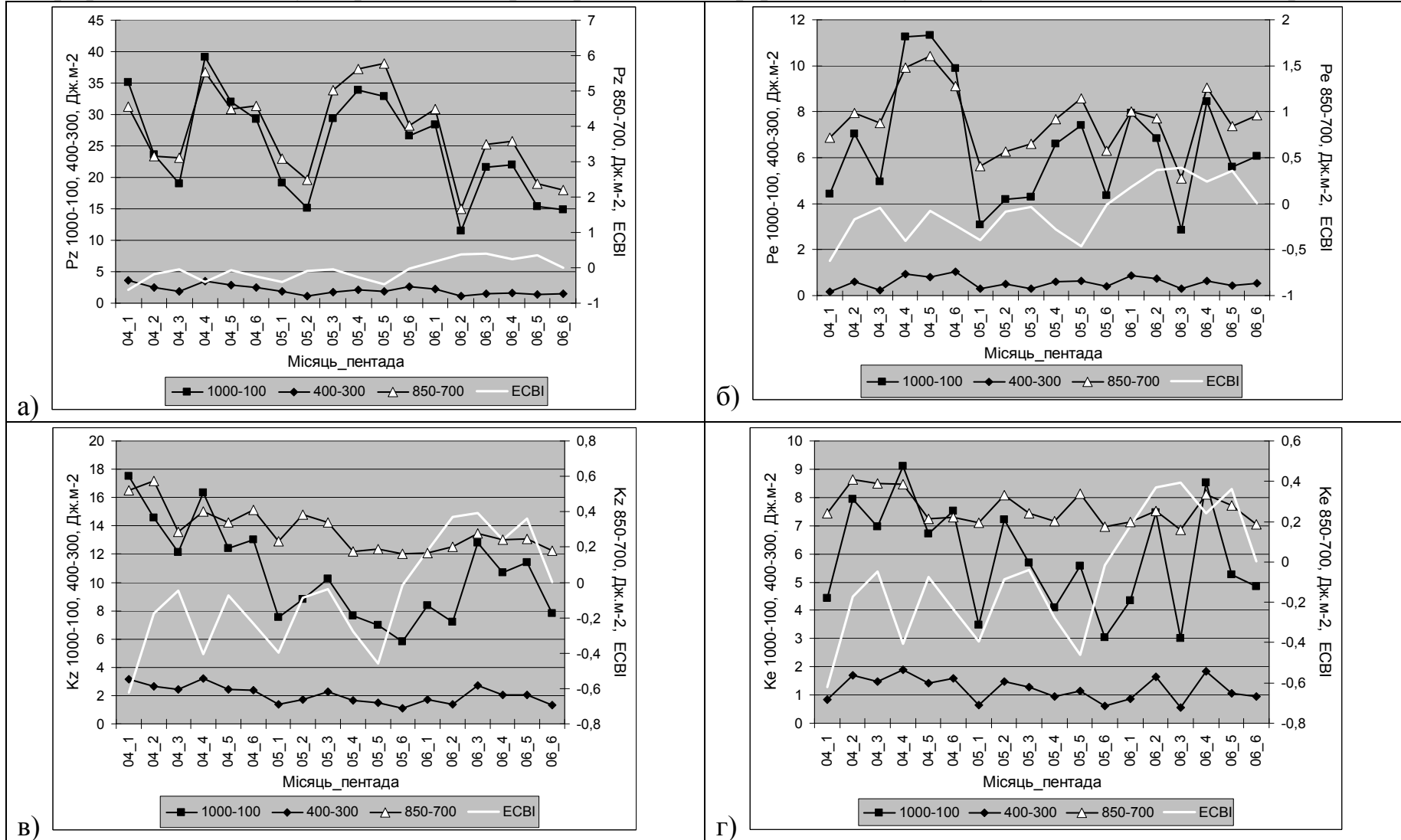


Рис. М.1. Часовий хід доступної потенціальної енергії ( $10^5$  Дж·м<sup>-2</sup>) зональної P<sub>z</sub> (а) і вихрової P<sub>e</sub> (б), кінетичної енергії ( $10^5$  Дж·м<sup>-2</sup>) зональної K<sub>z</sub> (в) і вихрової K<sub>e</sub> (г) за квітень-червень 1968 р.

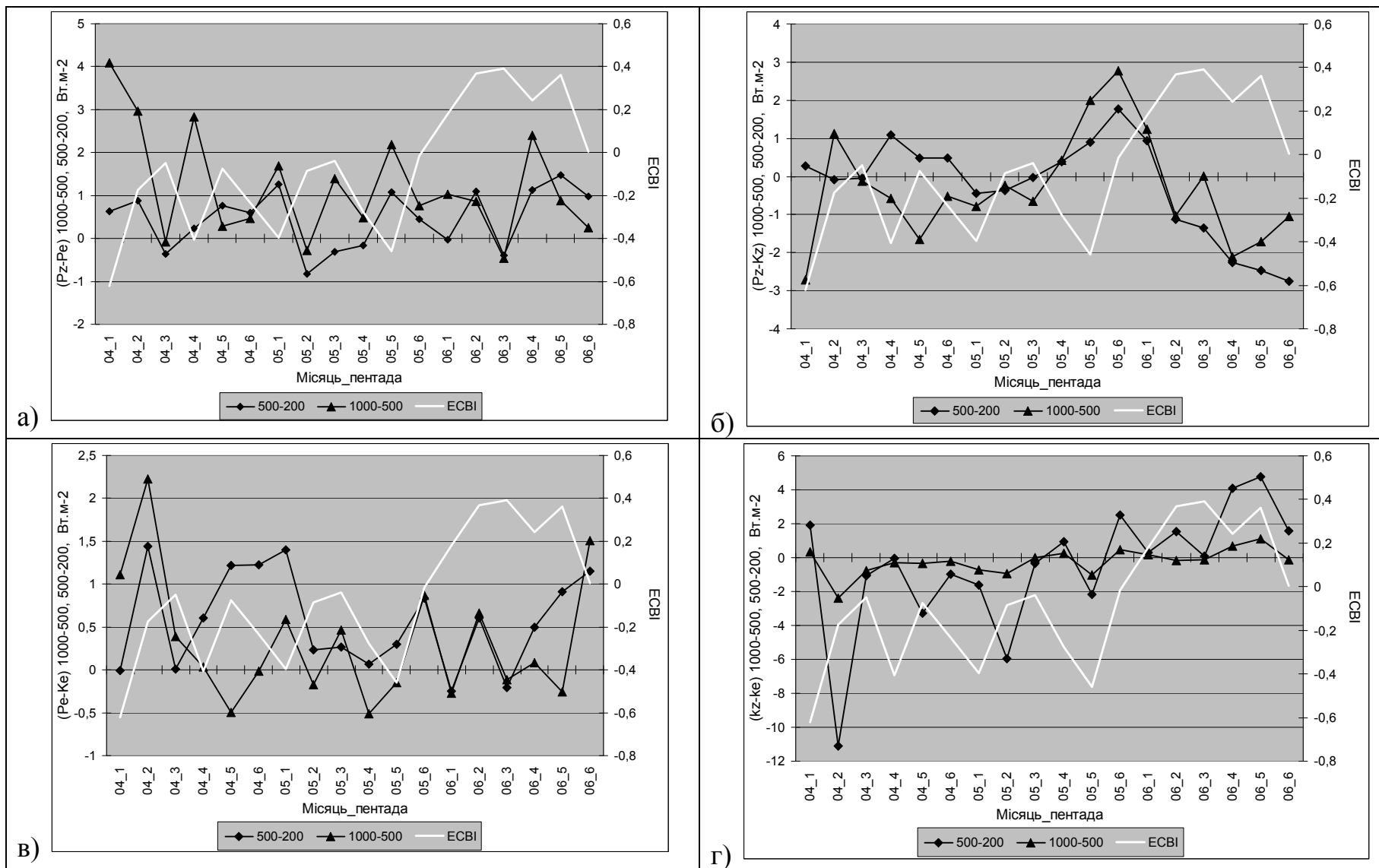


Рис. М.2. Часовий хід перетворень енергії (Вт·м<sup>-2</sup>): (а) - (P<sub>z</sub>-P<sub>e</sub>); (б) - (P<sub>z</sub>-K<sub>z</sub>); (в) - (P<sub>e</sub>-K<sub>e</sub>); (г) - (K<sub>z</sub>-K<sub>e</sub>) за квітень-червень 1968 р.

Додаток Н

Графіки часового ходу енергетичних характеристик атмосфери та індексу блокування ЕСВІ за вересень-листопад 2011 р.

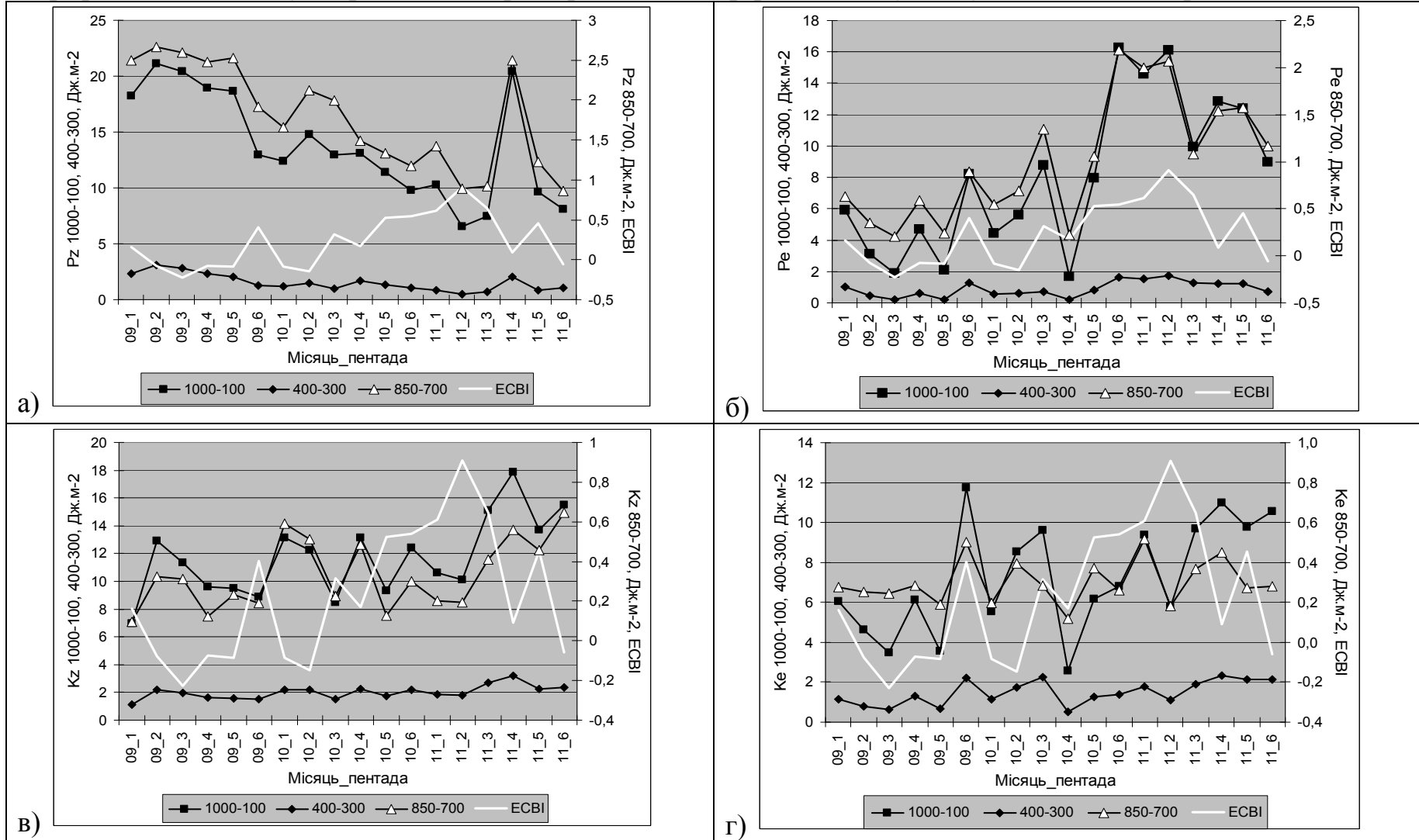


Рис. Н.1. Часовий хід доступної потенціальної енергії ( $10^5$  Дж·м<sup>-2</sup>) зональної P<sub>z</sub> (а) і вихрової P<sub>e</sub> (б), кінетичної енергії ( $10^5$  Дж·м<sup>-2</sup>) зональної K<sub>z</sub> (в) і вихрової K<sub>e</sub> (г) за вересень-листопад 2011 р.

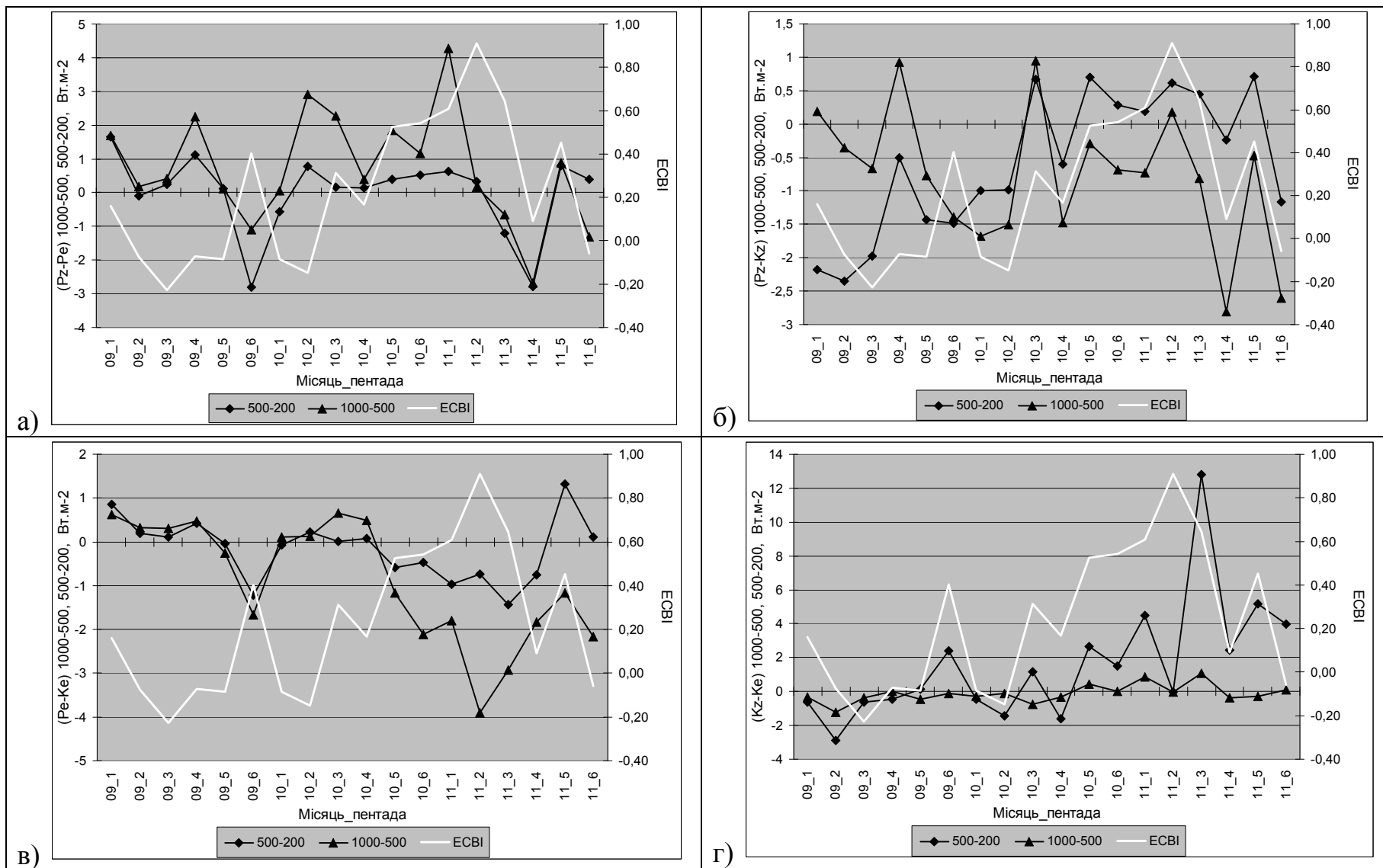


Рис. Н.2. Часовий хід перетворень енергії ( $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$ ): (а) -  $(P_z-P_e)$ ; (б) -  $(P_z-K_z)$ ; (в) -  $(P_e-K_e)$ ; (г) -  $(K_z-K_e)$  за вересень-листопад 2011 р.