

УДК 551.524.36+631.559 PACS: 92.70.Bc; 2.70.Kb

## СУЧАСНИЙ РЕЖИМ ХВИЛЬ ТЕПЛА ТА ЇХ ВПЛИВ НА УРОЖАЙНІСТЬ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР В УКРАЇНІ

І. Г. Семенова<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Одеський державний екологічний університет,  
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна

<sup>2</sup>Instituto Pirenaico de Ecología,  
Avda. Montañana, 1005, Zaragoza, Spain  
[in\\_home@ukr.net](mailto:in_home@ukr.net) <https://orcid.org/0000-0003-3383-4848>

Хвилі тепла є одним з найнебезпечніших метеорологічних явищ, прояв яких почастишав в усіх регіонах земної кулі в останні десятиліття. Через надмірно високі температури, які тривають довгий період часу, хвилі тепла викликають тепловий стрес у живих організмів і рослин, та негативно впливають на різні галузі економіки. Хоча механізм утворення хвиль тепла загалом відомий, питання визначення і завчасного передбачення інтенсивності та тривалості цих процесів, як й районів їх поширення, залишається відкритим, в тому числі через відсутність уніфікованого поняття хвилі тепла. В даному дослідженні проаналізовано просторово-часовий розподіл екстремально теплих днів та хвиль тепла за період 1996-2021 рр. по 16 областям України, в яких зосереджено виробництво основних зернових культур (озима пшениця, ярий ячмінь, кукурудза). Аналіз виконаний з використанням поверхневої температури  $T_s$ , яка містить в собі інформацію про температуру як поверхні землі, так і температуру рослинного покриву.

Отримано, що протягом періоду дослідження кількість екстремально теплих днів зростала по всіх областях країни і в усі сезони року, при цьому найбільш суттєве збільшення відбулося в останнє десятиліття в зимовий та осінній періоди. Найбільш теплим виявився 2020 р., коли по окремих областях кількість екстремально теплих днів досягала 100-106 за рік. Повторюваність хвиль тепла наприкінці періоду дослідження виросла майже в два рази порівняно з початком, досягнувши в середньому 8-10 випадків на рік. Середня сезонна повторюваність хвиль тепла становила 4-5 випадки влітку та від 2 до 4 випадків в інші сезони. Найтриваліші хвилі тепла у 17-19 днів зафіксовано по всім агрокліматичним зонам у серпні 2010 р. В інші сезони року максимальна тривалість хвиль тепла не перевищувала 10-14 днів. Статистична оцінка взаємозв'язку між сезонною кількістю екстремально теплих днів та урожайністю зернових культур показала, що збільшення таких днів весною призводить до зменшення урожайності озимої пшениці та ярого ячміню, а в літній період їх негативний вплив спостерігається для кукурудзи.

**Ключові слова:** хвиля тепла; екстремальна температура; поверхнева температура; урожайність

### 1. ВСТУП

Спостереження показують, що поточні кліматичні умови характеризуються стійким підвищенням температури повітря в усіх регіонах земної кулі протягом останніх двадцяти років. Починаючи з 2006 р., позитивні аномалії температури переважають в сезонному розподілі, при цьому середнє потепління над сушею є більш інтенсивним, ніж над океаном. Протягом останнього десятиліття перевищення глобальної приземної температури досягло приблизно 1,1 °C над рівнем 1850–1900 рр.

У глобальному масштабі екстремально високі температури (включаючи хвилі тепла) стали більш частими та інтенсивнішими в більшості регіонів суші з 50-х років минулого століття [1].

Стосовно Європейського континенту, то як зазначено у звіті Всесвітньої метеорологічної організації (ВМО) [2], в цьому регіоні спостерігалось підвищення температури в середньому на 0,5 °C кожне десятиліття, починаючи з 1991 р., тобто Європа нагрівається удвічі швидше, ніж інші регіони земної кулі, що викликає появу все більш частих несприятливих

та небезпечних погодних умов. У 2021 р. аномальні погодні явища призвели до сотень смертей, безпосередньо вплинули на стан здоров'я понад півмільйона людей і завдали економічних збитків на суму понад 50 мільярдів доларів. Порівняння хвилі тепла влітку 2021 р. в Європі з іншими, починаючи з 1950 р., показало, що ця подія виявилася третьою за площею й інтенсивністю, порівняно з рекордними хвилями тепла 2003 р. в Західній Європі та 2010 р. в Східній Європі [3]. Загалом, 83 % території Європи саме за останні 20 років зазнали влітку найбільш високих температур за останні 70 років.

2022 р. відзначився найбільш спекотним літом в Європі: температура повітря була найвищою за всю історію спостережень як за серпень, так і за сезон (червень – серпень) в цілому, при цьому вона перевищила на 0,8 °C температуру для серпня за 2018 р. та 0,4 °C температуру для літа за 2021 р. За даними Copernicus Climate Change Service (C3S) [4], під час хвилі тепла в середині липня 2022 р. у багатьох країнах Європи було побито температурні рекорди, зокрема в Португалії, західній Франції та Ірландії. В Англії температура вперше в історії спостережень піднялася вище за попередній національний рекорд у +38,7 °C на понад 40 станціях, а 19 липня 2022 р. зафіксовано максимальну температуру +40,3 °C в Лінкольнширі. Хвиля тепла розповсюджувалася на північні райони Європи, встановлюючи нові температурні рекорди в Німеччині та Скандинавії.

Для території України хвилі тепла (ХТ) також стали характерним явищем в останні десятиліття. Так, аналіз довгих рядів спостережень (1961-2015 рр.) за температурою повітря в літній сезон показав [5, 6], що найбільша кількість епізодів з хвилями тепла на всіх розглянутих станціях спостерігалась у 2001-2010 рр., при цьому, більшість випадків припали на станції, розташовані в центрі та на сході України. В це десятиріччя відмічено до 11-13 хвиль тепла на станціях в усіх областях країни. Найсильнішими за впливом через свою інтенсивність та тривалість виявилися так звані мега-хвилі тепла 2010 та 2015 років, за яких максимальна температура повітря по станціях України перевищувала повсюдно 35-37 °C, що викликало тривалий стан теплового стресу [7].

Як показують розрахунки з використанням даних кліматичного моделювання [8], очікується подальше зростання повторюваності хвиль тепла, при цьому їх кількість та інтенсивність значно збільшиться саме у холодний період року, особливо на півдні України.

Для дослідження хвиль тепла використовують досить різноманітні визначення, які впливають на формування статистики по цьому явищу на досліджуваних територіях. Часто поняття хвилі тепла носить регіональний або галузевий характер, адже високі температури мають різноманітний вплив як на життєдіяльність людини та її самопочуття, так й навколишнє середовище. В загальному сенсі, під хвилею тепла розуміють період екстремально високих температур, але кількісні визначення хвиль тепла відрізняються параметрами вимірювання кількості тепла та/або тривалістю періоду високих температур [9]. Як зазначається в [10], такими параметрами можуть виступати середньодобова, мінімальна, максимальна температура повітря, кількість днів в періоді високих температур, порогові значення температури (відносні або абсолютні), порогова інтенсивність тощо. Негативний вплив високих температур на організм людини підсилюється підвищеною вологістю повітря, яку також включають до розгляду при оцінці несприятливих погодних умов, використовуючи спеціальні біометеорологічні індекси [11, 12]. В Україні в дослідженнях найчастіше використовують визначення ВМО, яке виявилось досить зручним для використання та інформативним [13]: під хвилею тепла розуміють період, коли максимальна добова температура повітря п'ять або більше послідовних днів перевищує середню максимальну температуру для даного дня за базовий період (1961–1990 рр.) більш ніж на 5 °C.

Сучасні можливості моніторингу Землі з космосу дозволяють обирати інші види інформації для оцінки стану підстильної поверхні, яка підпадає під вплив високих температур повітря, включно з рослинним покривом, який може зазнавати стресового стану. Одним з таких теплових параметрів є поверхнева температура ( $T_s$ ), тобто фізична температура поверхні землі, яка визначається у відповідності до закону Планка ґрунтуючись на випромінюванні підстильної поверхні, що

вимірюється сенсором супутнику на відповідній довжині хвилі [14]. При цьому для покритих рослинністю поверхонь  $T_s$  часто представляє собою середню ефективну радіаційну температуру рослинного пологую та поверхні землі, хоча для високої та густої рослинності температура пологую може бути близькою до температури повітря. Як зазначається в дослідженнях з використанням цієї фізичної величини, поверхнева температура характеризує, перш за все, обмін енергією різномірних поверхонь на межі ґрунт (вода) – атмосфера [15]. Через це,  $T_s$  є дуже чутливою до зміни локального енергетичного балансу, порівняно з температурою повітря, швидко реагуючи на вплив адвекції різних повітряних мас. Також,  $T_s$  має більш високі добові та сезонні амплітуди, ніж температура повітря біля поверхні землі.

Поверхнева температура, що оцінюється за супутниковими інфрачервоними спостереженнями, має головне обмеження через неможливість отримати інформацію в районах, вкритих хмарністю, що призводить до необхідності осереднення за часом. Використання пасивних мікрохвильових інструментів [16] та комбінація цих видів інформації робить набори даних поверхневої температури незалежними від погоди, які включаються в системи моделювання, такі як Глобальна система асиміляції даних (the Global Land Data Assimilation System, GLDAS) [17], яка поєднує продукти супутникових і наземних спостережень, використовуючи вдосконалене моделювання процесів біля поверхні землі та техніку асиміляції даних. Завдяки властивості глобальності при спостереженні з супутників, поверхнева температура є зручною для вивчення тенденцій змін глобальної температури [18]. Так, оцінки трендів  $T_s$  в порівнянні з даними реаналізу ERA5 [19] показали, що за останні два десятиліття середня глобальна температура зростала на 0,26–0,34 °C за десятиліття, при цьому найбільше потепління зафіксовано в Арктиці у 0,72–0,86 °C за десятиліття, а в центральній і східній Європі воно становило 0,62 – 0,82 °C за десятиліття.

Метою даного дослідження є аналіз повторюваності екстремально високих температур та хвиль тепла на території України, визначених з використанням поверхневої

температури  $T_s$ , а також оцінка впливу ХТ на урожайність основних зернових культур.

## 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

В якості вихідних даних використані середні добові значення поверхневої температури по 16 областях України за всі місяці року в період 1996-2021 рр. Часові ряди осередненої по площі кожної області поверхневої температури з моделі GLDAS Catchment Land Surface Model L4 (V2.0) з кроком сітки 0,25° x 0,25° були отримані за допомогою сервісу NASA GIOVANNI (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/>).

Враховуючи різноманітність методів визначення теплових хвиль та вид вихідної інформації, що використана в даному дослідженні, було обрано наступний підхід. Для кожного календарного місяця в кожній адміністративній області було визначено величину 90% як порогове значення  $T_s$  та підраховано дні, коли  $T_s$  дорівнює порогові або перевищує його, тобто екстремально теплі дні. Хвиля тепла визначалася як безперервний період тривалістю 3 дні або більше, коли середньодобова температура  $T_s$  досягала або перевищувала порогові значення.

Були використані ряди даних середньообласної урожайності таких культур [20]: озима пшениця, ярий ячмінь, кукурудза. За ареалами найбільшого виробництва цих культур (рис. 1) для дослідження обрано наступні області України: Одеська, Миколаївська, Херсонська, Запорізька, Донецька, Дніпропетровська, Кіровоградська, Вінницька, Черкаська, Хмельницька, Полтавська, Харківська, Сумська, Чернігівська, Київська, Житомирська.

Попередній аналіз часових рядів зазначених культур показав, що в усіх областях спостерігалася суттєве зростання середньообласних показників починаючи з 2010-2011 рр., що, можливо пов'язано із зміною агротехнологій в цей період. Тому, для вилучення компоненти урожайності, не пов'язаної з погодними умовами, було проведено процедуру детренду часових рядів. Урожайність зернових культур за трендом визначалася за методом гармонійних ваг [21].



**Рис. 1** – Карти-схеми основних районів виробництва зернових культур в Україні у 2016-2020 рр. (зверху вниз): пшениця, ячмінь, кукурудза. Джерело USDA FAS: [https://ipad.fas.usda.gov/rssiw/als/up\\_cropprod.aspx](https://ipad.fas.usda.gov/rssiw/als/up_cropprod.aspx)  
**Fig. 1** – Schematic maps of the main cereal production areas in Ukraine in 2016-2020 (from top to bottom): wheat, barley, corn. Source USDA FAS: [https://ipad.fas.usda.gov/rssiw/als/up\\_cropprod.aspx](https://ipad.fas.usda.gov/rssiw/als/up_cropprod.aspx)

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

#### 3.1 Повторюваність екстремально теплих днів

Аналіз сумарної річної кількості днів з  $T_s \geq 90\%$  по областях показав, що у всіх агрокліматичних зонах спостерігалось значне зростання кількості екстремально теплих днів протягом періоду дослідження (рис. 2, а, б). Найбільше таких днів зафіксовано у 2020 р., при цьому максимум припав на лісостепову зону, в якій з восьми розглянутих областей у шести спостерігалось 100 і більше днів з екстремальними температурами. Абсолютний максимум у 109 днів припав на Полтавську область, 106 та 105 днів спостерігалось у Хмельницькій та Сумській областях відповідно. У Поліссі кількість днів з екстремальними температурами становила від 84 до 106, а у Степу коливалася від 74 днів (Херсонська область) до 96 днів (Кіровоградська область). Спекотними були також 2007 р. та 2012 р. для степової та лісостепової зон, коли максимальна кількість екстремально теплих днів склала 80-82 дні у Степу у 2012 р. та 70-72 дні у Лісостепу у 2007 р. У Лісостепу також вторинний максимум відмічався у 2010 р. (67-69 днів). Для зони Полісся вторинні максимуми кількості днів із екстремально високими температурами відмічені у 2007 та 2010 рр., коли сума днів склала від 57 до 70 на рік. Розраховані річні тренди по всім агрокліматичним зонам виявилися статистично значимими для 95% рівня значущості.

Кількість днів з екстремально високими температурами зростає у всі сезони року (рис. 3). Так, у зимовий період найбільше зростання кількості теплих днів спостерігалось у лісостеповій зоні, при цьому найтеплішими були зими 2019-2020 рр. та 2006-2007 рр. (рис. 3, а), коли максимальна кількість теплих днів склала від 25-26 у Степу до 40-44 днів у Лісостепу в першу зиму і від 25-26 днів у Степу до 30-31 дня у Лісостепу та Поліссі в другу зиму.

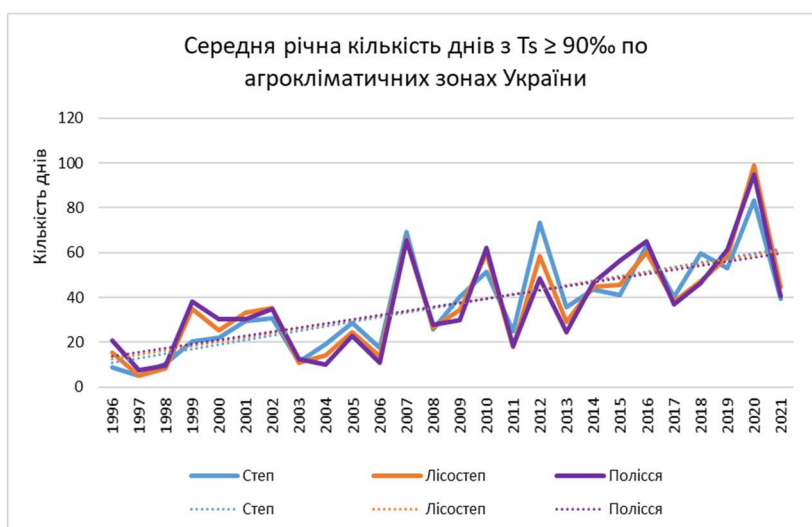
Навесні спостерігався помітний розкид кількості екстремально теплих днів між агрокліматичними зонами, при цьому найбільше зростання таких днів спостерігалось у степовій зоні (рис. 3, б). В досліджуваній період спостерігалось чотири максимуми кількості екстремально теплих днів: у 2014, 2007, 2000 та

2020 рр., коли середня сумарна кількість днів у весняні місяці відповідно становила 26-28 (Лісостеп, Полісся), 20-22 (Лісостеп, Полісся), 15-17 (Степ, Лісостеп) 20-21 (Степ).

У літній сезон екстремально теплим виявився 2010 р., коли максимальна кількість екстремально теплих днів у деяких областях лісостепової зони та Полісся сягала 39-41, у степовій зоні – 28-30 днів (рис. 3, в). Вторинний максимум екстремальної температури в Україні відмічений у 2012 р., коли в областях Степу кількість екстремально теплих днів становила

31-35. Висока повторюваність екстремумів температури відзначена також в літні місяці 2007 та 2016 рр., коли у степовій зоні максимальна кількість днів у деяких областях досягала 22-24 та 31-35 відповідно.

Восени спостерігалось поступове підвищення кількості екстремально теплих днів у всіх агрокліматичних зонах в середньому від 5-10 днів/сезон на початку періоду до 10-15 днів/сезон у 2011 – 2018 рр. (рис. 3, г).



а)



б)

**Рис. 2** – а) середня річна кількість днів з  $T_s \geq 90\%$  і їх тенденції по агрокліматичних зонах України та б) річна кількість днів з  $T_s \geq 90\%$  по областях України за період 1996-2021 рр.

**Fig. 2** – а) average annual number of days with  $T_s \geq 90\%$  and their trends by agroclimatic zones of Ukraine and б) annual number of days with  $T_s \geq 90\%$  by regions of Ukraine for the period 1996-2021



а)



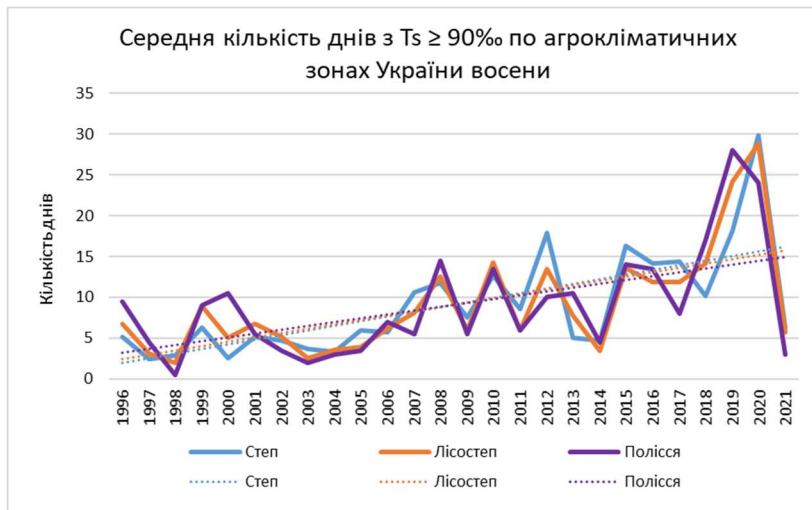
б)



в)

**Рис. 3** – Середня кількість днів з  $T_s \geq 90\text{‰}$  та їх тенденції по агрокліматичних зонах України за період 1996-2021 рр. в різні сезони: а) зима (грудень-лютий), б) весна (березень-травень), в) літо (червень-серпень)

**Fig. 3** – Average number of days with  $T_s \geq 90\text{‰}$  and their trends in agroclimatic zones of Ukraine for the period 1996-2021 in different seasons: a) winter (December-February), b) spring (March-May), c) summer (June-August)



з)

Рис. 3 – Продовження: г) осінь (вересень-листопад)

Fig. 3 – Continued: d) autumn (September-November)

У 2019 р. та 2020 р. відмічено різке збільшення кількості екстремально теплих днів восени, коли в усіх агрокліматичних зонах у деяких областях спостерігалось до 30-34 днів за сезон з екстремально високими температурами.

Обчислені тренди зростання кількості екстремально теплих днів для є статистично значимими (для 95 % рівня значущості) для всіх сезонів в усіх агрокліматичних зонах.

Загалом, отримані результати показали, що збільшення кількості днів з екстремально високими температурами відбувалося синхронно в усіх областях України, тобто кліматичні зміни, пов'язані з підвищенням температури, мають практично однакову швидкість та однакову інтенсивність по всій території країни.

### 3.2 Повторюваність і тривалість хвиль тепла

Аналіз повторюваності хвиль тепла, визначених за методикою, описаною вище, показав, що їх кількість збільшувалася протягом розглянутого періоду в усіх агрокліматичних зонах (рис. 4, а), при цьому всі тренди є статистично значимими (для 95% рівня значущості). В середньому за рік, кількість хвиль тепла збільшувалася від 1-2 на початку періоду до 9-10 наприкінці періоду, при цьому в останній 2021 р. кількість ХТ різко впала, особливо в областях Полісся (рис. 4, а, б).

У зимовий період в річному ході кількості ХТ, починаючи з 2004 р. спостерігалася

квазидворічна періодичність, внаслідок чого від року до року кількість хвиль тепла коливалася від нульових значень до 2-3 випадків, при загальному позитивному тренді по всіх агрокліматичних зонах (рис. 5, а). Найбільш теплими були зими 2017-2018 рр. та 2006-2007 рр., коли в областях Степу та Лісостепу фіксувалося по 3-4 випадки ХТ. У Поліссі теплими також були зими 2006-2007 рр., 2011-2012 рр. та 2015-2016 рр., з кількістю ХТ від 2 до 4 випадків.

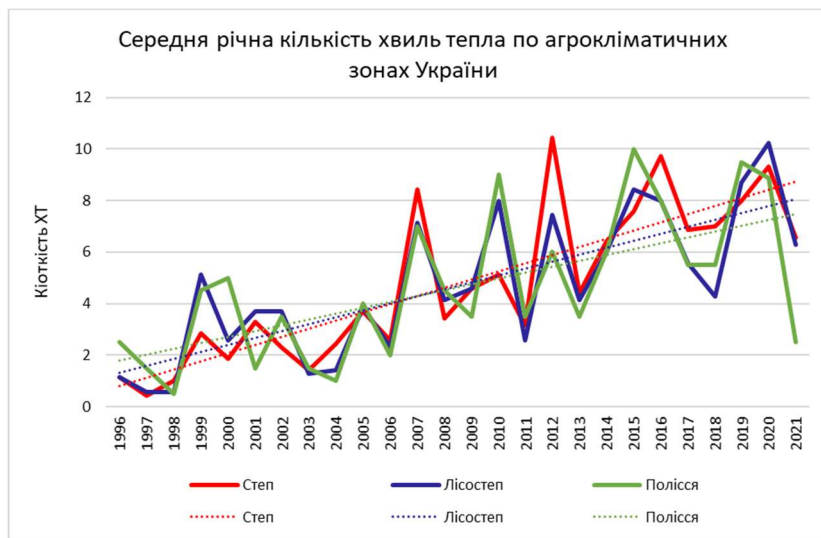
Навесні, до 2010 року, більша кількість хвиль тепла спостерігалось в Поліссі та Лісостепу (в середньому, від 1 до 2), проте, починаючи з 2012 р., при загальному зростанні кількості ХТ в усіх областях, вони стали переважати в Степу (рис. 5, б). Максимальна кількість весняних хвиль тепла спостерігалася у Миколаївській та Одеській областях у 2014 році – відповідно, 5 та 4 випадки.

У літній період, при загальному зростанні кількості хвиль тепла, основний максимум випадків припав на 2010 р., при цьому найбільша кількість ХТ зафіксована у Поліссі та Лісостепу, де у кількох областях (Полтавська, Сумська, Хмельницька, Чернігівська) спостерігалось 5-6 хвиль (рис. 5, в). У степовій зоні цього року середня кількість ХТ становила всього 2 випадки, і лише на Донеччині, на сході України, зафіксовано 5 випадків. Висока повторюваність хвиль тепла також відмічалася у 2016 р., коли у низці областей Лісостепу

(Вінницька, Харківська) та Степу (Донецька, Дніпропетровська) пройшло від 4 до 6 ХТ. Третім за повторюваністю йде літо 2012 р., коли в областях усіх агрокліматичних зон було зафіксовано від 2 до 4 хвиль тепла.

Восени повторюваність хвиль тепла також збільшувалася протягом періоду дослідження від 1-2 випадків у середньому на початку періоду до 3-5 випадків наприкінці (рис. 5, г). Найбільша

кількість осінніх ХТ спостерігалася у Поліссі, найменша – у Степу. Найтеплішою виявилася осінь 2019 р., коли у багатьох областях Полісся та Лісостепу зафіксовано 3-4 випадки хвиль тепла, а в Київській та Житомирській областях по шість ХТ. В областях Степу цього року спостерігалася 2-3 хвилі тепла і лише на Донеччині 4 випадки.



а)



б)

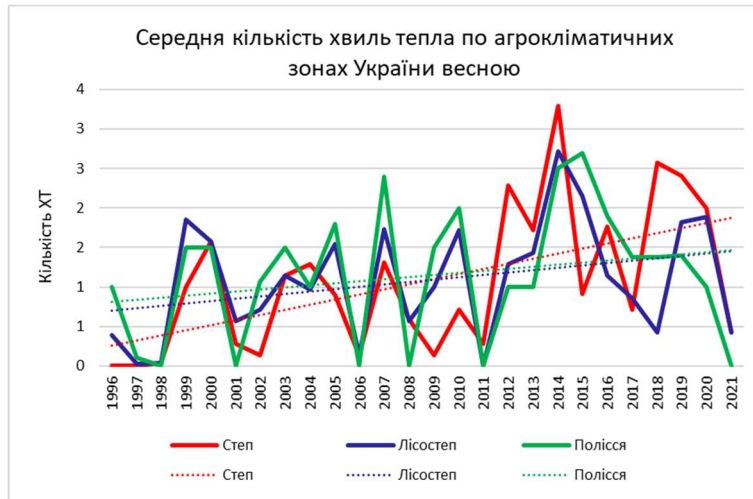
**Рис. 4** – а) середня річна кількість хвиль тепла і їх тенденції по агрокліматичних зонах України та б) річна кількість хвиль тепла по областях України за період 1996-2021 рр.

**Fig. 4** - а) average annual number of heat waves and their trends in agroclimatic zones of Ukraine and б) annual number of heat waves in the regions of Ukraine for the period 1996-2021





а)



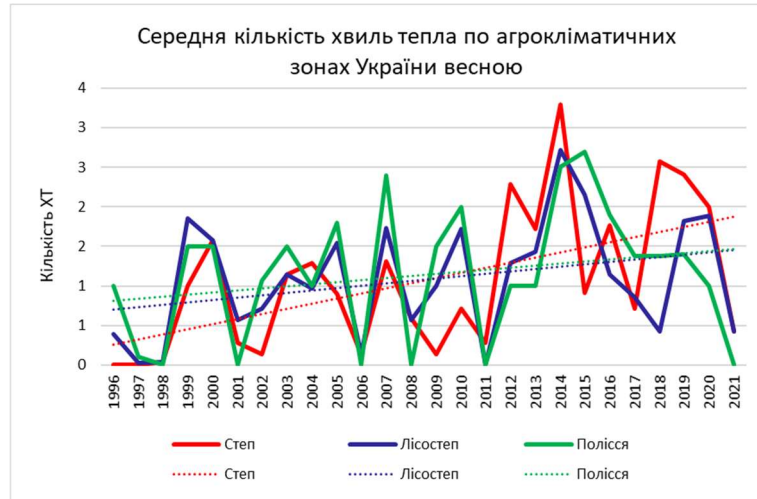
б)



в)

**Рис. 5** – Середня кількість хвиль тепла та їх тенденції по агрокліматичних зонах України за період 1996-2021 рр. в різні сезони: а) зима (грудень-лютий), б) весна (березень-травень), в) літо (червень-серпень)

**Fig. 5** – Average number of heat waves and their trends in agroclimatic zones of Ukraine for the period 1996-2021 in different seasons: a) winter (December-February), b) spring (March-May), c) summer (June-August)



е)

Рис. 5 – Продовження: г) осінь (вересень-листопад)

Fig. 5 – Continued: d) autumn (September-November)

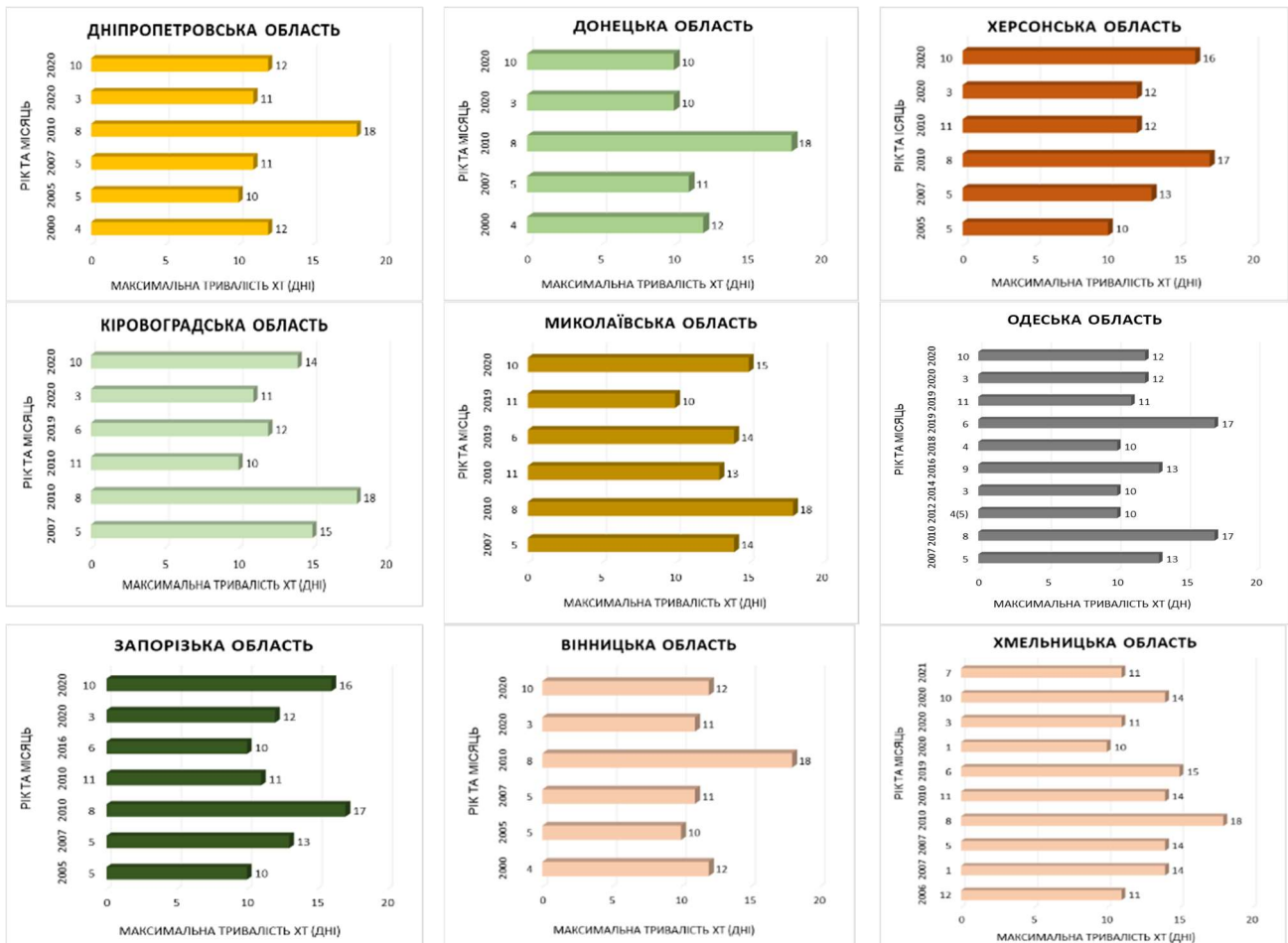


Рис. 6 – Повторюваність по областях України випадків хвиль тепла тривалістю 10 днів та більше

Fig. 6 – Frequency of heat waves lasting 10 days or more in the regions of Ukraine

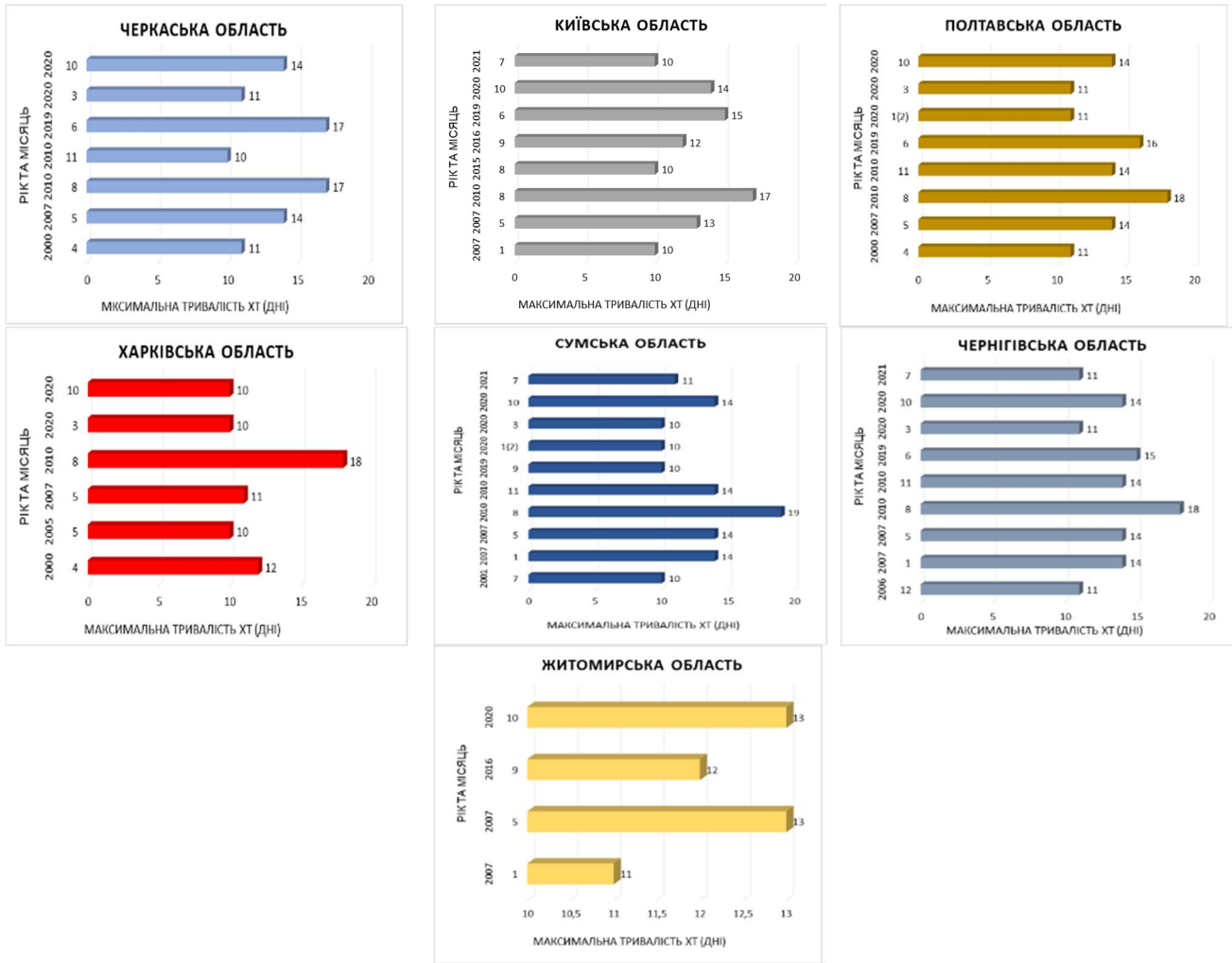


Рис. 6 – Продовження

Fig. 6 – Continued

В усі сезони по агрокліматичних областях обчислені позитивні тренди кількості хвиль тепла є статистично значимими (для 95 % рівня значущості). Слід відмітити, що повторюваність хвиль тепла має високу міжрічну мінливість, яка особливо виражена у зимовий період. Просторова неоднорідність у розподілі кількості хвиль тепла найхарактерніша для весняного періоду.

Щодо тривалості хвиль тепла, то в середньому цей період становить 4-7 днів. Взимку періоди коротші, у теплий сезон – довші. Тривалі хвилі тепла є особливо небезпечними, тому було проаналізовано повторюваність екстремальних випадків тривалістю 10 днів та більше (рис. 6). Найбільша кількість тривалих ХТ в розглянутий період в різні сезони спостерігалася в Одеській, Хмельницькій та

Сумській областях – по 10 випадків, а також в Чернігівській області (9 випадків). Найменше тривалі ХТ розповсюджені в Донецькій та Житомирській областях – 5 та 4 випадки відповідно. За досліджуваний період найбільша тривалість ХТ у 17-19 днів була зафіксована в багатьох регіонах України влітку, у серпні 2010 р.

Серед інших сезонів року, виділяється ХТ у жовтні 2020 р., яка спостерігалася в усіх розглянутих областях тривалістю 12-16 днів. Взимку найтриваліша ХТ (10-14 днів) виявилася у північних областях країни у січні 2007 р. Навесні найтриваліші хвилі тепла (10-14 днів) були зафіксовані у травні 2007 р. (всі області) та березні 2020 р. (в 13 областях).

### 3.3 Вплив екстремально високих температур на урожайність зернових культур

Дослідження, пов'язані із вивченням впливу змін клімату на рослини, перш за все, зосереджені на впливі посушливих явищ на швидкість росту та продуктивність рослин, при цьому цілеспрямованих експериментальних оцінок щодо впливу саме хвиль тепла, як зазначено у роботі [22], майже не існує. Висока температура як фактор, що може призводити до пригнічення та загибелі рослин, зокрема сільськогосподарських культур, врахована в оцінках такого явища як суховій [23]. Поєднання високих температур повітря з посухою прискорює загибель рослин не лише через вплив на їх надземні частини, але й через кореневу систему, яка зазнає надмірного нагріву та висушування. Як показали дослідження [24], хвилі тепла мають відкладену дію на шари ґрунту, максимальна температура яких досягається в середньому через 3-9 днів (в залежності від глибини) після періоду екстремально високих температур повітря. Виявити безпосередній вплив хвиль тепла на стресовий стан рослин допомагають супутникові спостереження, адже тривалі періоди високої температури повітря можуть значно знизити швидкість фотосинтезу, що врешті респіт відіб'ється на урожайності. Так, використання супутникового вегетаційного індексу SIF (solar-induced chlorophyll fluorescence), який містить у собі сигнали про біохімічні та фізіологічні процеси рослин, дозволило виявити тісний зв'язок цього параметру із суттєвим зниженням урожайності пшениці в регіонах, де спостерігалися періоди інтенсивної спеки протягом вегетаційного сезону [25].

Виконаний в даному дослідженні аналіз статистичного зв'язку між урожайністю зернових культур (озима пшениця, ярий ячмінь, кукурудза) в Україні та кількістю днів з екстремальними температурами у весняний та літній сезони показав, що навесні переважає негативний взаємозв'язок у більшості областей, за винятком північних та східних районів (рис. 7, а).

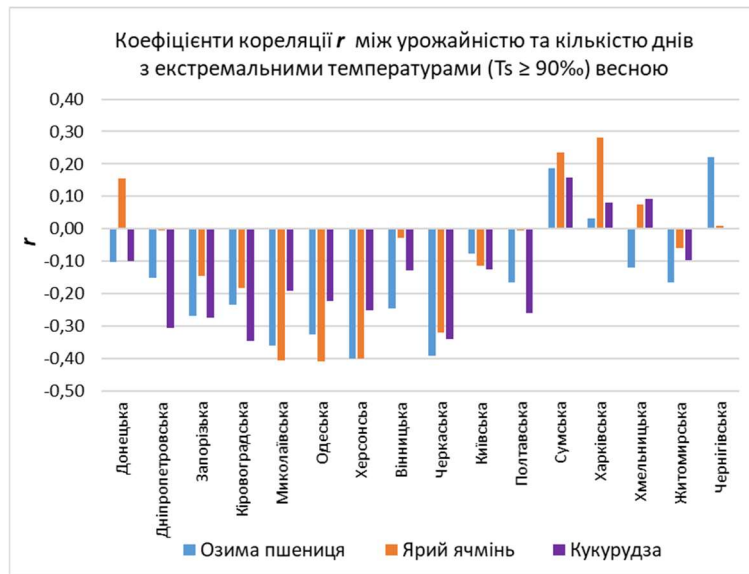
При цьому статистично значимі коефіцієнти кореляції (для 95 % рівня значущості) виявилися лише у південних і південно-західних областях. Тобто, загалом, підвищена повторюваність екстремально високих температур пригнічує

розвиток рослин, але в північних районах цей вплив може мати позитивний характер, можливо через більш швидкий прогрів ґрунту.

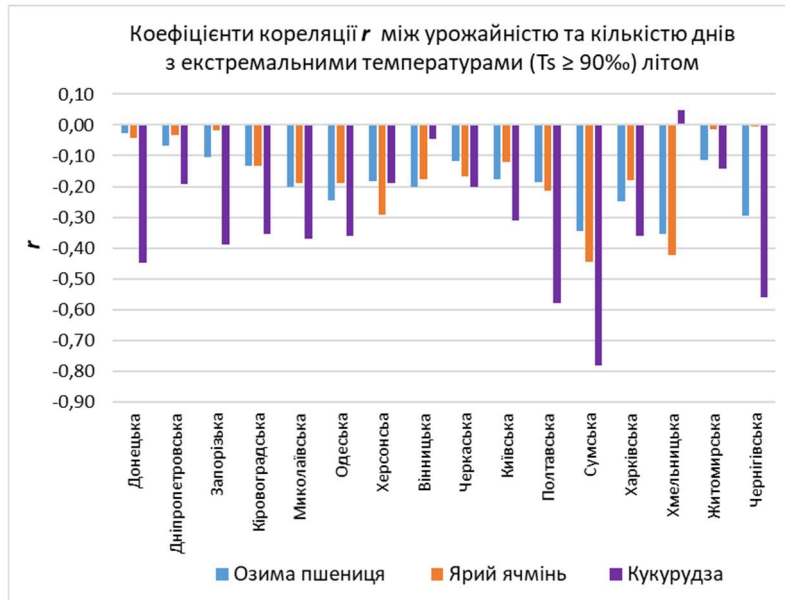
Повторюваність періодів екстремально високих температур влітку має помітний вплив переважно на урожайність кукурудзи (рис. 7, б), при цьому значущий статистичний зв'язок спостерігається у південно-східних, південно-західних та північних областях. Для озимої пшениці та ярого ячменя, які перебувають в літній період в останніх фазах свого фізіологічного розвитку, статистичний зв'язок урожайності з впливом періодів високих температур виявився слабким.

### 4. ВИСНОВКИ

Хвилі тепла є одним з небезпечних метеорологічних явищ, прояв яких почастишав в Європі на тлі глобальних кліматичних змін в останні десятиліття. Аналіз отриманих трендів повторюваності екстремально теплих днів, визначених за допомогою поверхневої температури  $T_s$ , та їх послідовних періодів тривалістю три та більше днів показав, що ці показники зростали протягом останніх 25 років в усіх областях України. Кількість екстремально теплих днів збільшилася в усі сезони року, при цьому в холодному сезоні цей процес особливо помітний в Лісостепу, а навесні – в степовій зоні. Найбільша кількість екстремально теплих днів в усіх агрокліматичних зонах України спостерігалася у 2020 р., переважно за рахунок значної повторюваності аномально високих температур в зимовий та осінній сезони. Повторюваність хвиль тепла також зростала по всій території країни, при цьому, починаючи з 2007 р. їх річна кількість досягала в середньому 8-10 випадків на рік, що вдвічі більше, ніж на початку досліджуваного періоду. Хвилі тепла спостерігалися в усі сезони року, але найбільш довгі притаманні для літа, коли їх тривалість в окремих випадках перевищувала два тижні. Збільшення кількості осінніх, та особливо зимових хвиль тепла свідчить про суттєві зміни регіональної циркуляції атмосфери над Європою в ці сезони року (наприклад, в [26]), внаслідок чого наступають тривалі періоди стійкого переносу теплих повітряних мас на територію України із заходу або південного заходу.



а)



б)

**Рис. 7** – Кореляційний зв'язок між урожайністю зернових культур та кількістю днів з екстремальними температурами ( $T_s \geq 90\%$ ) по областях України а) весною (березень-травень), б) літом (червень-серпень)

**Fig. 7** – Correlation between the yield of cereal crops and the number of days with extreme temperatures ( $T_s \geq 90\%$ ) by regions of Ukraine in a) spring (March-May), b) summer (June-August)

В літній період основний внесок в утворення хвиль тепла належить блокуючим процесам, які супроводжуються встановленням малорухомого, високого антициклону, при цьому в останні десятиліття спостерігалися тренди до посилення антициклонічних процесів в літній та осінній період над Європою [27], що позначилося на збільшенні частоти появи аномально високих

температур в регіоні. Отримані результати свідчать, що збільшення кількості екстремально теплих днів весною має негативний вплив на урожайність таких культур як озима пшениця та ярий ячмінь, а літні хвилі тепла негативно впливають на урожайність кукурудзи в більшості областей України. Таким чином, врахування поточних та прогнозованих тенденцій

щодо динаміки екстремально високих температур над Європою, та Україною зокрема, може слугувати одним з дієвих механізмів адаптації суспільства і економічної діяльності до поточних та очікуваних змін клімату.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Masson-Delmotte V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.). Cambridge University Press. In Press.
- Temperatures in Europe increase more than twice global average. Published 2 November 2022. Press Release Number: 02112022. URL: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/temperatures-europe-increase-more-twice-global-average> (дата звернення 20.11.2022 р.)
- Lhotka O., Kyselý J. The 2021 European heat wave in the context of past major heat waves. *Earth and Space Science*. 2022. 9. e2022EA002567. <https://doi.org/10.1029/2022EA002567>
- Europe continued to swelter in July. Copernicus Climate Change Service (C3S). URL: <https://climate.copernicus.eu/europe-continued-swelter-july> (дата звернення 18.11.2022 р.)
- Shevchenko O., Lee H., Snizhko S., Mayer H. (2014). Long-term analysis of heat waves in Ukraine. *Int. J. Climatol*. 2014. 34. Pp. 1642-1650. <https://doi.org/10.1002/joc.3792>
- Long-term analysis of thermal comfort conditions during heat waves in Ukraine. *Geographia Polonica / Shevchenko O., Snizhko S., Zapototskyi S. et al.* 2022. 95(1). <https://doi.org/10.7163/GPol.0226>
- Biometeorological Conditions during the August 2015 Mega-Heat Wave and the summer 2010 Mega-Heat Wave in Ukraine / Shevchenko O., Snizhko S., Zapototskyi S., Matzarakis A. *Atmosphere*. 2022. 13(1). <https://doi.org/10.3390/atmos13010099>
- Особливості динаміки хвиль тепла в окремих містах України / Сафранов Т., Катеруша Г., Катеруша О., Яраї К. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2021. 55. С. 232-244. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-17>
- Smith T. T., Zaitchik B. F., Gohlke J. M. (2013). Heat waves in the United States: definitions, patterns and trends. *Climate Change*. 2013. Jun, 118 (3-4). Pp. 811-825. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0659-2>
- Evaluating the Sensitivity of Heat Wave Definitions among North Carolina Physiographic Regions / Puvvula J. et al. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 2022. 19. <https://doi.org/10.3390/ijerph191610108>
- A retrospective analysis of American football hyperthermia deaths in the United States / Grundstein A.J., Ramseyer C., Zhao F. et al. *Int. J. Biometeorol*. 2012. 56. Pp. 11–20. <https://doi.org/10.1007/s00484-010-0391-4>
- Heat Waves and Health: Guidance on Warning System Development / Edited by G. McGregor. WMO-1142 Publisher: World Meteorological Organization, 2015. 95 p.
- Шевченко О. Г., Сніжко С. І. Хвилі тепла та основні методологічні проблеми, що виникають при їх дослідженні. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2012. № 11. С. 101-108. URL: <https://uhmj.org.ua/index.php/journal/issue/view/11/11-2012-pdf> (дата звернення 25.11.2022 р.)
- Jin M., Dickinson R. E. Land surface skin temperature climatology: benefitting from the strengths of satellite observations. *Environ. Res. Lett.* 2010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/4/044004>
- Prigent C., Aires F., Rossow W. B. Land surface skin temperatures from a combined analysis of microwave and infrared satellite observations for an all-weather evaluation of the differences between air and skin temperatures. *J. Geophys. Res.* 2003. 108(D10). 4310. <https://doi.org/10.1029/2002JD002301>.
- Geophysical Union / Ermida S.L. et al. 2019. 124. P. 844, <https://doi.org/10.1029/2018JD029354>
- The Global Land Data Assimilation System / Rodell M. et al. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2004. 85(3). Pp. 381–394. <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-381>
- Sobrino J. A., Julien Y., García-Monteiro S. Surface Temperature of the Planet Earth from Satellite Data. *Remote Sens.* 2020. 12. <https://doi.org/10.3390/rs12020218>
- Wang You-Ren, Hessen D.O., Samset B.H., Stordal F. Evaluating global and regional land warming trends in the past decades with both MODIS and ERA5-Land land surface temperature data. *Remote Sensing of Environment*. 2022. 280. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113181>.
- Держстат України. Сільське господарство. Рослиництво. Обсяг виробництва, урожайність та зібрана площа сільськогосподарських культур за їх видами по регіонах. URL: [https://ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu\\_u/cg.htm](https://ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/cg.htm) (дата звернення 22.11.2022 р.)
- Полевой А. Н. Теория и расчет продуктивности сельскохозяйственных культур. Ленинград: Гидрометеиздат, 1983. 175 с.
- Underappreciated plant vulnerabilities to heat waves / Breshears, D. D. et al. *New Phytol.* 2021. 231. Pp. 32-39. <https://doi.org/10.1111/nph.17348>
- Zolotokrylin A. N. Dry winds, dust storms and prevention of damage to agricultural land. *Natural Disasters / Edited by Kotlyakov V. M. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS): Paris, France, 2010. Vol. II. Pp. 1–18.*
- Effects of heat waves on soil temperatures in Slovenia / Pogačar T., Kajfež Bogataj L., Kuk R., Črepišek Z. *Italian Journal of Agrometeorology*. 2022. 1. Pp. 41-48. <https://doi.org/10.36253/ijam-1388>
- Assessing the Response of Satellite Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence and NDVI to Impacts of Heat Waves on Winter Wheat in the North China Plain / Chenjie Xian et al. *Advances in Meteorology*. 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/8873534>

26. Trends in frequency and persistence of atmospheric circulation types over Europe derived from a multitude of classifications / Kučerová M., Beck C., Philipp A., Huth R. *Int. J. Climatol.* 2017. 37. Pp. 2502-2521. <https://doi.org/10.1002/joc.4861>
27. (2015). Contribution of changes in atmospheric circulation patterns to extreme temperature trends / Horton, D., Johnson, N., Singh, D. et al. *Nature*. 2015. 522. Pp. 465–469. <https://doi.org/10.1038/nature14550>

## REFERENCES

1. Masson-Delmotte V. P. et al. (eds.). *IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. In Press.
2. *Temperatures in Europe increase more than twice global average. Published 2 November 2022. Press Release Number: 02112022.* Available at: <https://public.wmo.int/en/media/press-release/temperatures-europe-increase-more-twice-global-averagep>.) (accessed 20.11.2022)
3. Lhotka, O., & Kyselý, J. (2022). The 2021 European heat wave in the context of past major heat waves. *Earth and Space Science*, 9, e2022EA002567. <https://doi.org/10.1029/2022EA002567>
4. *Europe continued to swelter in July. Copernicus Climate Change Service (C3S).* Available at: <https://climate.copernicus.eu/europe-continued-swelter-july> (accessed 18.11.2022)
5. Shevchenko, O., Lee, H., Snizhko, S. & Mayer, H. (2014). Long-term analysis of heat waves in Ukraine. *Int. J. Climatol.*, 34, pp. 1642-1650. <https://doi.org/10.1002/joc.3792>
6. Shevchenko, O. et al. (2022). Long-term analysis of thermal comfort conditions during heat waves in Ukraine. *Geographia Polonica*, 95 (1). <https://doi.org/10.7163/GPol.0226>
7. Shevchenko, O., Snizhko, S., Zapototskyi, S. & Matzarakis, A. (2022). Biometeorological Conditions during the August 2015 Mega-Heat Wave and the summer 2010 Mega-Heat Wave in Ukraine. *Atmosphere*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/atmos13010099>
8. Safranov, T., Katerusha, H., Katerusha O. & Yaraei, K. (2021). Osoblyvosti dynamiky khvyli' tepla v okremykh mistakh Ukrayiny [Features of the dynamics of heat waves in selected cities of Ukraine]. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series "Geology. Geography. Ecology"*, 55, pp. 232-244. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-17> (in Ukr.)
9. Smith, T.T., Zaitchik, B.F. & Gohlke, J.M. (2013). Heat waves in the United States: definitions, patterns and trends. *Climate Change*, Jun, 118 (3-4), pp. 811-825. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0659-2>
10. Puvvula, J. et al. (2022). Evaluating the Sensitivity of Heat Wave Definitions among North Carolina Physiographic Regions. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 19. <https://doi.org/10.3390/ijerph191610108>
11. Grundstein, A.J., Ramseyer, C., Zhao, F. et al. (2012). A retrospective analysis of American football hyperthermia deaths in the United States. *Int. J. Biometeorol.*, 56, pp. 11–20. <https://doi.org/10.1007/s00484-010-0391-4>
12. McGregor, G. (ed.) (2015). *Heat Waves and Health: Guidance on Warning System Development*. WMO-1142 Publisher: World Meteorological Organization.
13. Shevchenko, O. & Snizhko, S. (2012). Khvyli tepla ta osnovni metodolohichni problemy, shcho vynykayut' pry yikh doslidzhenni [The heat waves main methodological problems, which appears during the research]. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 11, pp. 101-108. Available at: <https://uhmj.org.ua/index.php/journal/issue/view/11/11-2012-pdf> (in Ukr.)
14. Jin, M. & Dickinson, R.E. (2010). Land surface skin temperature climatology: benefiting from the strengths of satellite observations. *Environ. Res. Lett.*, 5. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/4/044004>
15. Prigent, C., Aires, F. & Rossow, W.B. (2003). Land surface skin temperatures from a combined analysis of microwave and infrared satellite observations for an all-weather evaluation of the differences between air and skin temperatures. *J. Geophys. Res.*, 108(D10), 4310. <https://doi.org/10.1029/2002JD002301>.
16. Ermida, S.L. et al. (2019). Quantifying the Clear-Sky Bias of Satellite Land Surface Temperature Using Microwave-Based Estimates. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, American Geophysical Union, 124, p. 844. <https://doi.org/10.1029/2018JD029354>
17. Rodell, M., P. et al. (2004). The Global Land Data Assimilation System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3), pp. 381–394. <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-381>
18. Sobrino, J.A., Julien, Y. & García-Monteiro, S. (2020). Surface Temperature of the Planet Earth from Satellite Data. *Remote Sens.*, 12. <https://doi.org/10.3390/rs12020218>
19. Wang, You-Ren, Hessen, D.O., Samset, B.H. & Stordal, F. (2022). Evaluating global and regional land warming trends in the past decades with both MODIS and ERA5-Land land surface temperature data. *Remote Sensing of Environment*, 280. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113181>.
20. The State Statistics Service of Ukraine. Agriculture, forestry and fishing. Agriculture. Volume of production, yield and harvested area of agricultural crops by their types. Available at: [https://ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu\\_u/cg.htm](https://ukrstat.gov.ua/operativ/menu/menu_u/cg.htm)
21. Polevoy, A.N. (1983). *Teoriya i raschet produktivnosti sel'skokhozyaystvennykh kul'tur [Theory and calculation of the productivity of agricultural crops]*. Leningrad : Gidrometeoizdat. (in Russ.)
22. Breshears, D.D. et al. (2021). Underappreciated plant vulnerabilities to heat waves. *New Phytol*, 231, pp. 32-39. <https://doi.org/10.1111/nph.17348>
23. Zolotokrylin, A.N.(2010). Dry winds, dust storms and prevention of damage to agricultural land. In: Kotlyakov, V.M. (ed.). *Natural Disasters*. Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS): Paris, France, vol. II, pp. 1–18.
24. Pogačar, T., Kajfež Bogataj, L., Kuk, R. & Črepinšek, Z. (2022). Effects of heat waves on soil temperatures in Slovenia. *Italian Journal of Agrometeorology*, 1, pp. 41-48. <https://doi.org/10.36253/ijam-1388>
25. Chenjie, Xian et al. (2020). Assessing the Response of

- Satellite Solar-Induced Chlorophyll Fluorescence and NDVI to Impacts of Heat Waves on Winter Wheat in the North China Plain. *Advances in Meteorology*, 2020, Article ID 8873534. <https://doi.org/10.1155/2020/8873534>
26. Kučerová, M., Beck, C., Philipp, A. & Huth, R. (2017). Trends in frequency and persistence of atmospheric circulation types over Europe derived from a multitude of classifications. *Int. J. Climatol.*, 37, pp. 2502-2521. <https://doi.org/10.1002/joc.4861>
27. Horton, D., Johnson, N., Singh, D. et al. (2015). Contribution of changes in atmospheric circulation patterns to extreme temperature trends. *Nature*, 522, pp. 465-469. <https://doi.org/10.1038/nature14550>

## THE CURRENT REGIME OF HEAT WAVES AND THEIR IMPACT ON THE YIELD OF CEREAL CROPS IN UKRAINE

I. G. Semenova<sup>1,2</sup>

*Odessa State Environmental University,  
15, Lvivska St., 65016, Odesa, Ukraine,*

*<sup>2</sup>Instituto Pirenaico de Ecología,  
Avda. Montañana, 1005, Zaragoza, Spain*

[in\\_home@ukr.net](mailto:in_home@ukr.net) <https://orcid.org/0000-0003-3383-4848>

Heat waves are one of the most dangerous meteorological phenomena, the manifestations of which have become more frequent in all regions of the globe in recent decades. Due to excessively high temperatures persisting for a long time, heat waves cause heat stress in living organisms and plants, and negatively affect various sectors of the national economy. Although the mechanism of heat wave formation is well known, the question of determining and predicting the intensity and duration of these processes in advance, as well as the areas of their propagation, remains open, including due to the lack of unified concept of a heat wave. This study analyzed the spatiotemporal distribution of extremely warm days and heat waves for the period 1996-2021 in 16 regions of Ukraine, where the production of the main agricultural crops (winter wheat, spring barley, corn) is concentrated. The analysis was performed using the surface skin temperature  $T_s$ , which contains information about the temperature of both the canopy and ground surface.

It was found that during the study period, the number of extremely warm days increased in all regions of the country and in all seasons of the year, with the most significant increase occurring in the last decade in winter and autumn. The warmest year was 2020, when the number of extremely warm days in some regions reached 100-106 per year. The frequency of heat waves at the end of the study period almost doubled compared to the beginning, reaching an average of 8-10 cases per year. The average seasonal frequency of heat waves was 4-5 cases in summer and 2-4 cases in other seasons. The longest heat waves lasting 17-19 days were recorded in all agro-climatic zones in August 2010. In other seasons, the maximum duration of heat waves did not exceed 10-14 days.

Statistical assessment of the relationship between the seasonal number of extremely warm days and the grain yield crops showed that an increase in these days in the spring leads to decrease in the yield crops of winter wheat and spring barley; in summer this negative impact is observed for corn.

**Keywords:** heat wave; extreme temperature; surface skin temperature; crop yield.

Подання до редакції : 02. 12. 2022

Находження остаточної версії : 13. 12. 2022

Публікація статті : 27. 12. 2022