

Мінливість тривалості сонячного сйва на теренах Західної України

Дарія ХОЛЯВЧУК^{1*}  <https://orcid.org/0000-0002-7489-7848>
Ірина МАРКО¹

УДК 551.582(075.8)

ПОШУКОВА СТАТТЯ

¹Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
кафедра фізичної географії, геоморфології та палеогеографії

Листування – *d.kholyavchuk@chnu.edu.ua

Ключові слова: тривалість сонячного сйва, мінливість клімату, регіональна атмосферна циркуляція, атмосферне забруднення, супутникові дані.

Анотація: У цій статті досліджено зміни тривалості сонячного сйва як важливої радіаційної характеристики клімату, яка слугує індикатором мінливості регіональної атмосферної циркуляції і забруднення приземної атмосфери. У дослідженні використані довгострокові наземні спостереження за допомогою геліографа і супутникові дані високої роздільної здатності SARAH-3 CMSAF.

Дослідження періоду з 1961 по 1990 роки в Західній Україні вказує на низку особливостей. Південно-західна частина регіону є найбільш сонячною. Широтні зміни тривалості сонячного сйва мінімальні, поступаючи місцем помітному зростанню континентальності із заходу на схід. Упродовж року для липня характерні найвищі значення тривалості сонячного сйва, особливо на південному сході, південному заході і північному заході. Грудень демонструє найнижчі значення з помітними коливаннями у низькогірних долинах і на північному заході. Для осінніх і весняних місяців властивий складний широтний розподіл під впливом сезонних трансформацій циркуляції атмосфери.

Протягом останніх тридцяти років зміни тривалості сонячного сйва в Західній Україні узгоджуються із загальноєвропейськими тенденціями, пов'язаними з глобальним проясненням. Такі зміни не суттєві, за винятком заходу і у розрізі січня. У Чернівцях з 1991 по 2020 рр. спостерігається помітна мінливість у перехідні сезони в поєднанні з коливаннями сонячної активності та циркуляційних систем. Останні два десятиліття, відзначені значними коливаннями тривалості сонячного сйва, вказують на мінливість північноатлантичної в західній частині регіону, і можливо, вплив зростання забруднення атмосфери.

Дослідження підтверджує складний зв'язок між тривалістю сонячного сйва, регіональною динамікою клімату і ширшим контекстом глобальних тенденцій, що вказує на перспективу використання цієї радіаційної характеристики для вивчення змін клімату в регіональному і локальному масштабах.

1. ВСТУП

Радіаційні характеристики клімату – одні з визначальних індикаторів змін клімату. Сучасні дослідження у цьому напрямі свідчать про неузгодженість глобальних тенденцій змін температури зі змінами параметрів сонячної радіації упродовж останніх десятиліть (Masson-Delmotte et al. 2021; Parding et al. 2016; Spinoni et al. 2015; Urraca et al. 2017).

2023, 845; DOI: <https://doi.org/10.31861/geo.2023.845.52-64>

 Open Access. © 2023 Д. ХОЛЯВЧУК, І. МАРКО
опубліковано у Чернівецькому національному університеті

Ця робота ліцензується відповідно до

CC BY-NC-ND із Зазначенням Авторства – Некомерційна – Без Похідних 4.0 Міжнародна



Міжурядова група експертів з питань змін клімату (IPCC) вказує на незначну частку внеску природного радіаційного чинника (близько 5 % потужності) у кліматичні зміни, а, окрім того, навіть на неістотне зростання в останні 40 років (Masson-Delmotte et al. 2021; Myhre et al. 2013). Упродовж останніх трьох десятиліть на теренах Західної України, як і Європи загалом (Kothe et al. 2013, 2017; Sanchez-Lorenzo et al. 2008; Spinoni et al. 2015), виявлено зростання інтенсивності приземної сумарної сонячної радіації, хоча в останньому десятиріччі дещо менше (Холявчук 2019). Мінливість радіаційних характеристик сонячної радіації пов'язують із циклами «глобального затемнення» (1950–1980-ті рр.) і «глобального прояснення» (з 1980-х рр. до сьогодні). Останній період пояснюють зменшенням атмосферного забруднення та хмарності (Power 2003; Ruckstuhl, Norris 2009; Wang et al. 2012).

У свою чергу, хмарність, як і детермінована нею тривалість сонячного сяйва, відображає регіональні і локальні атмосферні циркуляційні процеси (Parding et al. 2016; Pozo-Vázquez et al. 2004; Uscka-Kowalkowska et al. 2015), що підтверджено і у попередніх дослідженнях автора (Cebulska, Kholiavchuk 2022). На теренах Західної України виявлено, що мінливість інтенсивності приземної сонячної радіації залежить від повторюваності та інтенсивності баричних систем регіональної атмосферної циркуляції (циклонів та антициклонів) (Kholiavchuk 2022).

Тривалість сонячного сяйва, яку визначають як час, протягом якого пряма сонячна радіація перевищує певний поріг (зазвичай на рівні 120 Вт м^2) обернено пов'язана з хмарністю. Вона також може бути цінною для виявлення довгострокових коливань вмісту аерозолів у приземній атмосфері (Dumitrescu et al. 2017). Довгі ряди спостережень і більша об'єктивність, ніж хмарність чи видимість, визначають придатність використання тривалості сонячного сяйва для пояснення змін клімату, спричинених як природними (радіаційним і циркуляційним), так і антропогенними чинниками (забруднення повітря).

Відповідно дослідження спрямоване на виявлення просторово-часової мінливості тривалості сонячного сяйва упродовж останніх 60 років на теренах Західної України. Для цього дослідження передбачає розв'язання низки завдань:

- порівняння даних тривалості сонячного сяйва за наземними та супутниковими спостереженнями;
- виявлення багаторічних, сезонних і місячних змін тривалості сонячного сяйва за даними наземних метеостанцій;
- визначення закономірностей просторової мінливості за даними супутникового моніторингу;
- оцінка змін тривалості сонячного сяйва упродовж і між двома періодами (кліматичними нормами) – 1960–1991 рр. і 1991–2020 рр.

2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

2.1. Наземні спостереження на метеостанціях

На теренах Західної України функціонує 14 метеостанцій, які ведуть тривалі спостереження за тривалістю сонячного сяйва за допомогою геліографа Кемпбелла-Стокса (ГУ-1) (рис. 1). Якість цих спостережень суттєво залежить від локальних факторів розташування приладу (затіненість, висота), інструментальних (тип стрічки, властивості скла кулі) і методичних аспектів (професіоналізму спостерігачів), тому у більшості європейських країн спостерігається тенденція до заміни геліографа на автоматизований прилад з універсальними багатоцільовими датчиками сонячного випромінювання типу BF5 (Bartoszek 2018; Owczarek, Malinowska 2023; Urban, Zając 2017).

Попередні дослідження із порівняння супутникових і наземних даних тривалості сонячного сяйва на прикладі території України (2011–2019 рр.) вказують на значну кореляцію

(0,64–0,7) між цими двома видами даних у літні місяці (Кихтенко, Тимофєєв 2022). Окрім того, виявлено, що супутникові дані точніші, зважаючи на суб'єктивні недоліки вимірювання за допомогою геліографа. Натомість автоматизовані наземні прилади точніші за супутникові дані і краще узгоджуються між собою (коефіцієнт кореляції – 0,85–0,88) (Matuszko et al. 2020; Owczarek, Malinowska 2023). Найменше узгоджуються дані зимових місяців і березня. Здійснене нам порівняння даних спостережень за геліографом і супутниковими даними упродовж 1990–2021 рр. вказує на подібні особливості. Найвищий коефіцієнт кореляції характерний для літніх місяців (0,69–0,8) і нижчий для осінніх (0,61–0,67). Так особливості необхідно враховувати при інтерпретації даних.

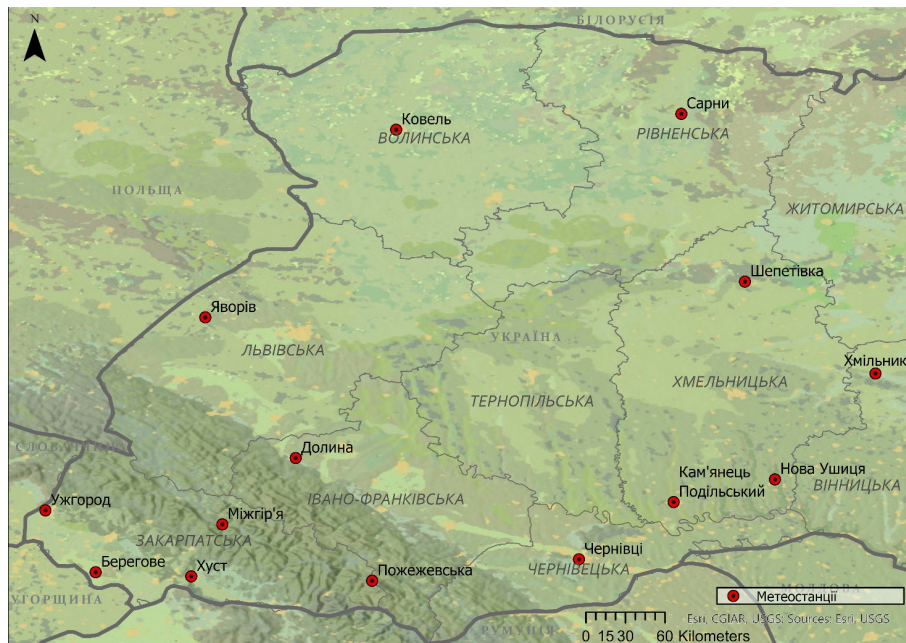


Рис. 1. Метеостанції Національної мережі гідрометеорологічних спостережень, на яких ведуть спостереження за тривалістю сонячного сйва

У дослідженні проаналізовані середні величини та екстремуми, стандартне відхилення і трендові зміни тривалості сонячного сйва на метеостанціях у різних фізико-географічних умовах на основі даних Кліматичного кадастру України (Кліматичний кадастр... 2006) і даних спостережень за тривалістю сонячного сйва у м. Чернівці у 1991–2020 рр.

2.2. Супутникові дані

Для побудови просторово-часових моделей використані дані третього видання супутникового запису кліматичних даних про тривалість сонячного сйва Heliosat (SARAH-3) CMSAF Європейського космічного агентства (ESA). Дані отримують із супутникових спостережень видимих каналів приладів MVIRI та SEVIRI, встановлених на борту геостационарних супутників Meteosat. SARAH-3 охоплює період з 1983/01/01 до 2023/11/31 як запис кліматичних даних (CDR) (Pfeifroth et al. 2023). Продукт доступний у вигляді місячних і добових сумарних значень на регулярній сітці широти/довготи з просторовою роздільною здатністю $0,05^\circ \times 0,05^\circ$. Запис даних доповнюється вичерпною документацією про використані алгоритми, генерацію запису, валідацію та гомогенізацію даних.

У дослідженні використані дані за період 1991–2020 рр., що відповідає останній кліматичній нормі і дає змогу порівняти із даними наземних метеостанцій. Для просторового моделювання середніх величин, стандартного відхилення і трендової оцінки виконаний геостатистичний аналіз у середовищі ArcGIS Pro.

Д. Холявчук, І. Марко.

Мінливість тривалості сонячного сйва на теренах Західної України

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Тривалість сонячного саява за даними наземних метеостанцій

Упродовж 1961–1990 рр. на теренах Західної України спостерігали від 1371 до 1934 годин сонячного саява за рік (рис. 2). Найбільш сонячними були південно-західні терени Закарпатської низовини. Тут у деякі роки тривалість сонячного саява перевищувала 2000 годин, що характерно для середземноморського типу клімату. У ці роки не виявлено типової широтної зміни кліматичних показників. Так, річна тривалість сонячного саява на півночі регіону подекуди не нижча за тривалість на південному-сході Західної України, що вказує на вплив локальних кліматотвірних чинників (розчленування рельєфу і місцевої атмосферної циркуляції). Натомість помітний розвиток континентальності, виражений у поступовому зростанні річної тривалості сонячного саява із заходу на схід (рис. 2).

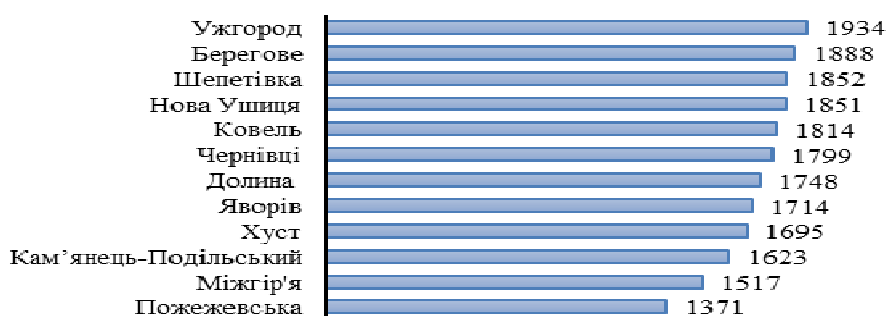


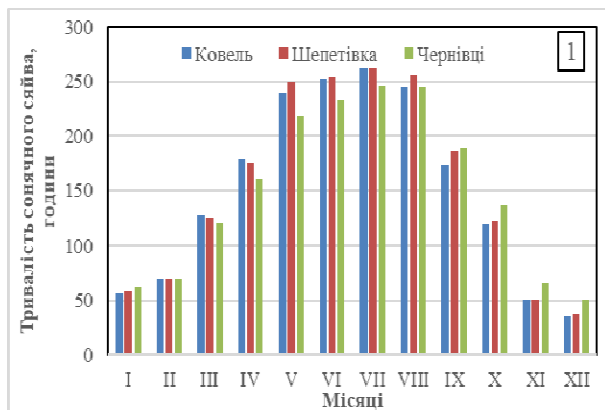
Рис. 2. Середня сумарна річна тривалість сонячного саява на метеостанціях Західної України у 1961–1990 рр.

Упродовж року у ході тривалості сонячного саява виразні більші відмінності. Загалом найвищі значення характерні для липня, перевищуючи 250 годин на південному сході, південному заході і навіть на північному заході (рис. 3). Водночас на північному заході, як і решті західних метеостанцій регіону, у липні виявлена висока мінливість сонячного саява, пов'язана з активністю північноатлантичних циклонів і підвищеною хмарністю (рис. 4). Згадані процеси виступають причиною ще більшої мінливості сонячного саява у червні.

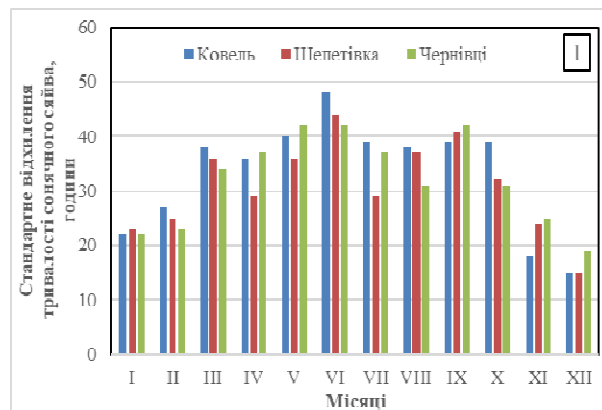
Найнижчу сумарну тривалість сонячного саява, сезонно зумовлену, упродовж 1961–1990 рр. спостерігали у грудні (<50 годин) (рис. 3). У цей місяць найнижчі значення з найбільшою кількістю днів без сонячного саява (до 20 днів) характерні для низькогірних улоговин Карпат і північного заходу (27–38 годин). Найскладніший розподіл значень характерний для місяців перехідних сезонів осені та весни, у напрямку із заходу на схід зокрема. Проте, у ці сезони, у зв'язку з перебудовою сезонних циркуляційних процесів, добре вираженим був широтний розподіл значень сумарної тривалості сонячного саява із півночі на південь: зростання восени і зниження навесні. У цей час у горах більша тривалість сонячного саява закономірно характерна для передгір'їв і низькогір'їв із дещо вищими значеннями на південно-західному макросхилі. У перехідні сезони найвищі значення спостерігали у травні на сході регіону (до 250 годин), а найнижчі (46–48 годин) у низькогірних і височинних улоговинах. З-поміж станцій вирізняється сезонний хід тривалості сонячного саява з відносно низькими значеннями упродовж року у м. Кам'янець-Подільський, на що, очевидно, впливає розташування у каньйонній долині р. Смотрич. Найзахідніші метеостанції (Яворів, Хуст) вирізняються найбільшою мінливістю значень у жовтні, що свідчить загалом про загальну мінливість регіональної циркуляції у цей час, пов'язану з впливом Північноатлантичного коливання (рис. 4).

Зважаючи на доступні дані, окремо детально проаналізований хід тривалості сонячного саява упродовж 1991–2020 р. у м. Чернівці, яке розташоване на південному сході регіону у долині річки Прут на межі Прут-Дністерського межиріччя і Передкарпаття. Такі умови

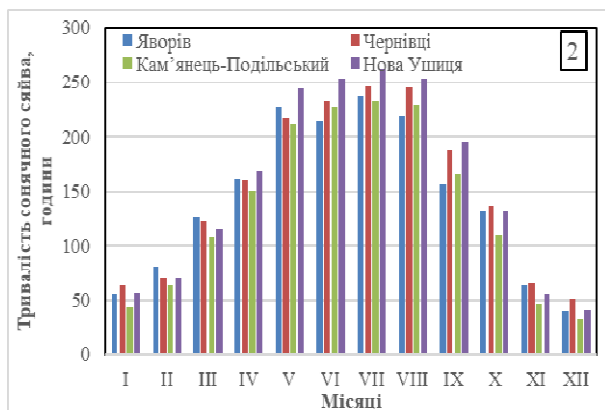
визначають накладання прояву континентальності, впливу гір і долини на трансформацію умов зволоження та накопичення антропогенних аерозолів. Внаслідок цього тривалість сонячного сйва у Чернівцях зонально та меридіонально не висока. Для м. Чернівці характерний виражений сезонний розподіл тривалості сонячного сйва. Упродовж року 42 % сонячного сйва припадає на літо, 30 % – на весняні і місяці, 20 % – на осінь, 8 % – взимку. У розрізі місяців розподіл сумарної тривалості загалом схожий на попередній період (рис. 5).



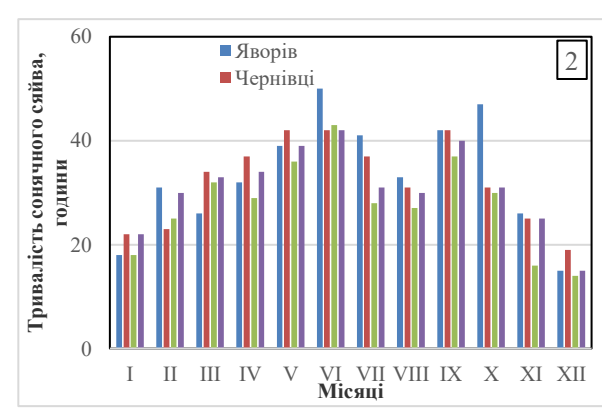
а



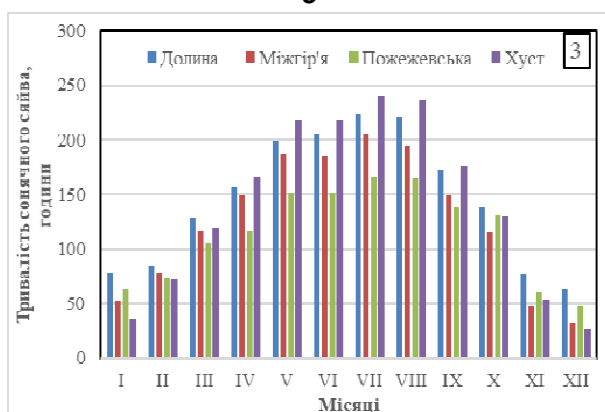
а



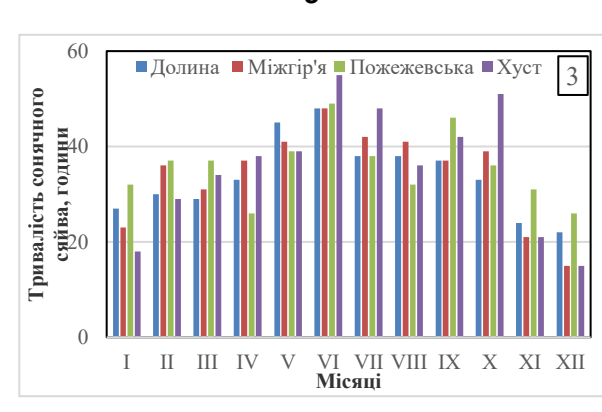
б



б



с



с

Рис. 3. Середня сумарна тривалість сонячного сйва на метеостанціях Західної України у 1961–1990 рр.: а – широтний профіль; б – меридіональний профіль; с – гірський профіль

Рис. 4. Стандартне відхилення сумарної тривалості сонячного сйва на метеостанціях Західної України у 1961–1990 рр.: а – широтний профіль; б – меридіональний профіль; с – гірський профіль

Найвищі значення тривалості сонячного сйва у 1991–2020 рр. також спостерігались у липні, а найнижчі – у грудні, хоча середні значення, порівнюючи з 1961–2020 р., переважно

Д. Холявчук, І. Марко.

Мінливість тривалості сонячного сйва на теренах Західної України

(окрім квітня) на 10–20 годин нижчі. Відмінна ознака цього періоду – значні коливання тривалості сонячного сяйва у місяці теплого періоду року, у травні і серпні, що відображає загальне потепління цих місяців та зміщення дощових періодів на ці місяці (рис. 5). Зокрема, у серпні стало більше років (10) із відносно низькою тривалістю сонячного сяйва (нижче 200 годин за місяць). Натомість зафіксовано більше сонячних вереснів, особливо в останньому десятиріччі, і меншою мірою у січні. Так, у 2020 році був зафіксований максимум тривалості сонячного сяйва за останні 30 років – 103 години.

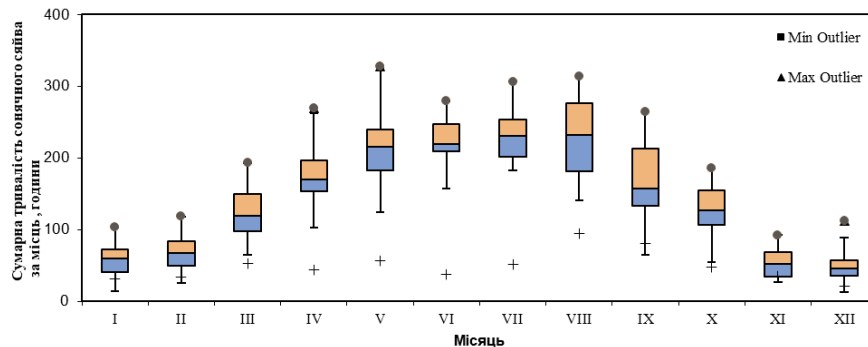


Рис. 5. Діаграма розмаху сумарної тривалості сонячного сяйва у м. Чернівці по місяцях упродовж 1991–2020 рр.

3.2. Тривалість сонячного сяйва за супутниковими даними

Просторовий розподіл тривалості сонячного сяйва за супутниковими даними вказує на подібні особливості, хоча значення загалом вищі, порівняно з наземними спостереженнями. Для липня характерний меридіональний розподіл тривалості сонячного сяйва із яскраво вираженою азональністю при наближенні до гірської споруди Карпат. Зменшення кількості сонячних годин з висотою пов'язуємо з бар'єрною функцією гір, де фіксують на 100 годин сонячного сяйва на місяць менше, ніж у східній рівнинній частині регіону (рис. 6). Азональними елементами виступають і рівнинні рельєфні підняття, зокрема Хотинська та Подільська височини. Вони ж виділяються найвищими значеннями тривалості сонячного сяйва понад 260 годин за місяць на південному сході як результат різноманіття схилів поверхонь і прояву континентальності. Просторово найбільша зволоженість приземної атмосфери над західними ділянками рівнинної частини визначає найбільшу мінливість тривалості сонячного сяйва над Розточчям у липні.

Низька сумарна тривалість сонячного сяйва у січні, але вища, ніж у грудні, пов'язана із сезонним розподілом сонячної радіації у помірних широтах (рис. 7). У січні можна також спостерігати розподіл тривалості сонячного сяйва у зв'язку з орографічними особливостями поверхні. Гірська система Карпат виступає бар'єром у просторовому розподілі тривалості сонячного сяйва із найвищими значеннями над гірськими масивами як наслідок трансформації північноатлантичної та середземноморської регіональних атмосферних циркуляцій (рис. 7). Відповідно цікаво, що у зимовий період року зменшення тривалості сонячного сяйва із заходу на схід у зв'язку із континентальністю не виражене. У цей час найбільша мінливість тривалості сонячного сяйва характерна для Подільської височини. Водночас тут спостерігаються і найвищі значення.

3.3. Зміни тривалості сонячного сяйва

Упродовж останніх тридцяти років зміни тривалості сонячного сяйва на теренах Західної України відповідають загальноєвропейських тенденціям, пов'язаних із глобальним проясненням (Kazadzis et al. 2018; Kothe et al. 2013, 2017; Spinoni et al. 2015), та загальноукраїнським у теплий період року (Рибченко, Савчук 2010). Так, у липні над

теренами Західної України виявлено незначне зростання тривалості сонячного сйва (рис. 8). Окрім того, лише на заході та у передгір'ях такі зміни у продовж 1961–2020 рр. є статистично значимими. Такі особливості також пов'язуємо із почастищенням антициклональних типів погоди (Kholiavchuk 2022), а отже і меншою кількістю хмарних днів. Натомість у Прут-Дністерському межиріччі і Східно-Подільській височинній області такі зміни мало помітні.

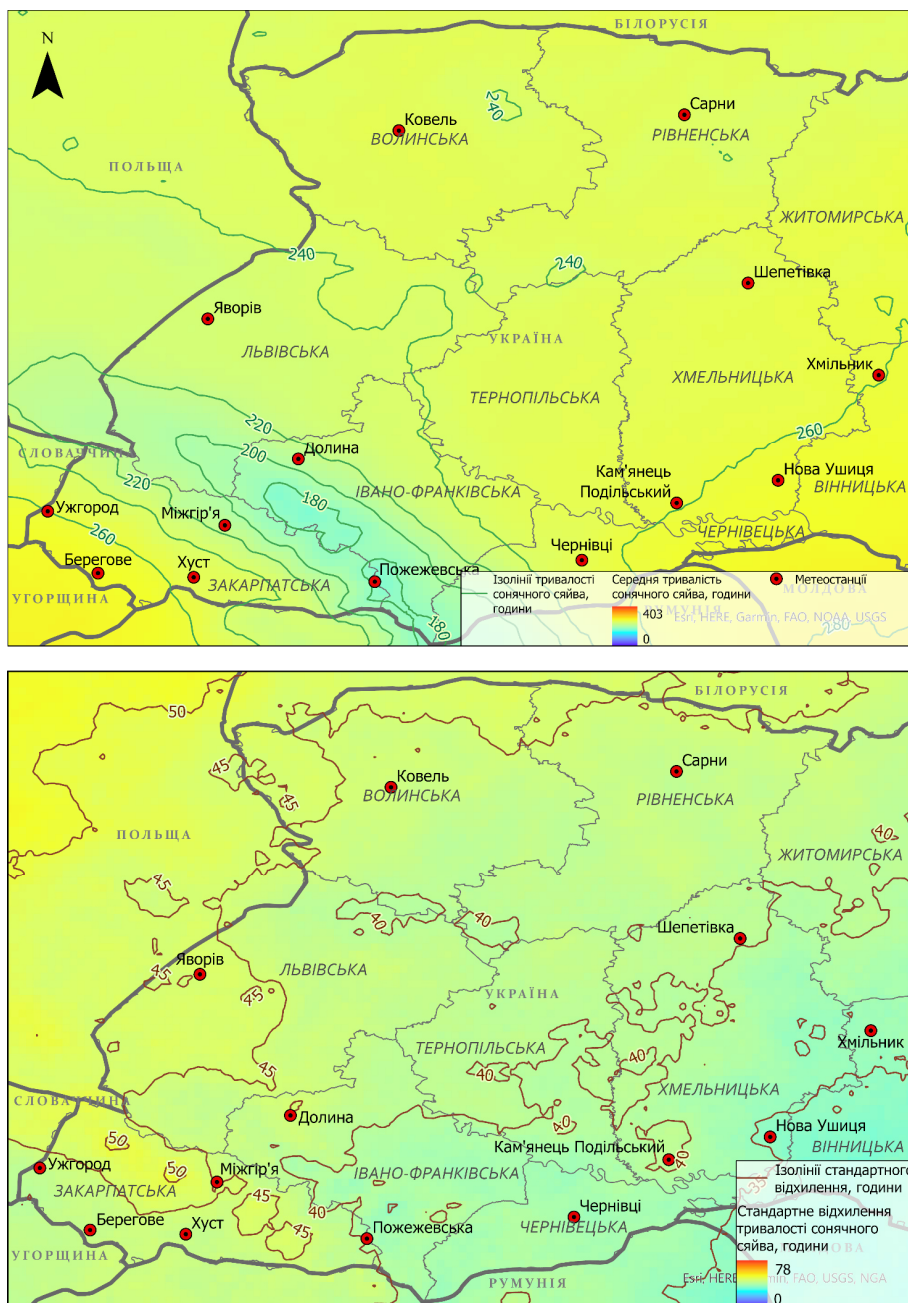


Рис. 6. Сумарна тривалість сонячного сйва на теренах Західної України у липні у 1991–2020 рр.: середні значення і стандартне відхилення

Ще менші зміни виявлені у холодний період року у всьому регіоні. Сумарна тривалість сонячного сйва у січні або дуже несуттєво зросла, або у Карпатах несуттєво знизалась (рис. 9). Окрім того, такі зміни не є статистично значимими змінами у більшості регіону. Виняток становить регіон Розточчя із статистично значимими змінами сумарної місячної тривалості у січні (рис. 9). Такі особливості можливо пов'язані з потеплінням і посушінням зими, особливо на самому заході території України.

Д. Холявчук, І. Марко.

Мінливість тривалості сонячного сйва на теренах Західної України

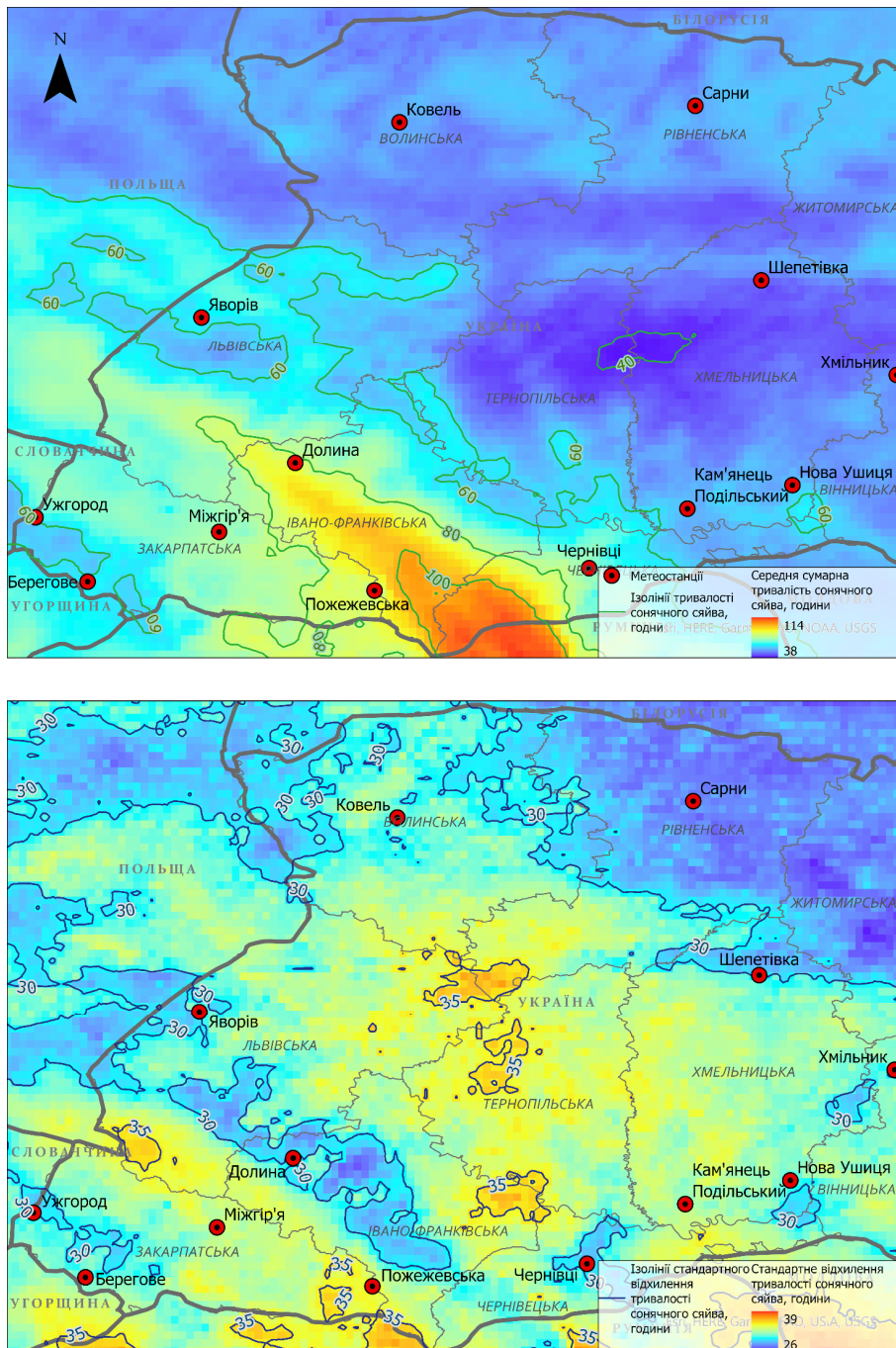


Рис. 7. Сумарна тривалість сонячного сйва на теренах Західної України у січні у 1991–2020 рр.: середні значення і стандартне відхилення

У Чернівцях упродовж останніх 30 років спостерігали загалом зростання сумарної тривалості сонячного сйва за рік, особливо в останні два десятиріччя. Проте, якщо порівняти період з 1985 по 2000 рік з відрізком часу з 2000 по 2020 рік, загальна річна сума тривалості сонячного сйва зросла на 260 годин (з 1525 до 1795 годин). Натомість найнижчі річні значення були характерні для 90-х рр. XX ст., що відповідали спадній частині 22-го циклу сонячної активності. Мінімальний річний показник зафіксований у 1997 році (1246 години). Максимуми ж спостерігались у сухих 2012 (1992 год) і 2019 (1970 год) роках. Загалом, починаючи з 1999 року, міжрічна мінливість сумарної тривалості сонячного сйва значно скоротилась, а середньомісячні показники значно перевищують останні кліматичні норми.

Д. Холявчук, І. Марко.

Мінливість тривалості сонячного сйва на теренах Західної України

Тенденції зростання тривалості сонячного сйва упродовж останнього десятиріччя не відповідають найнижчому за сонячною активністю за останні 100 років 24-му сонячному циклу, що підтверджує антропогенний характер сучасного потепління.

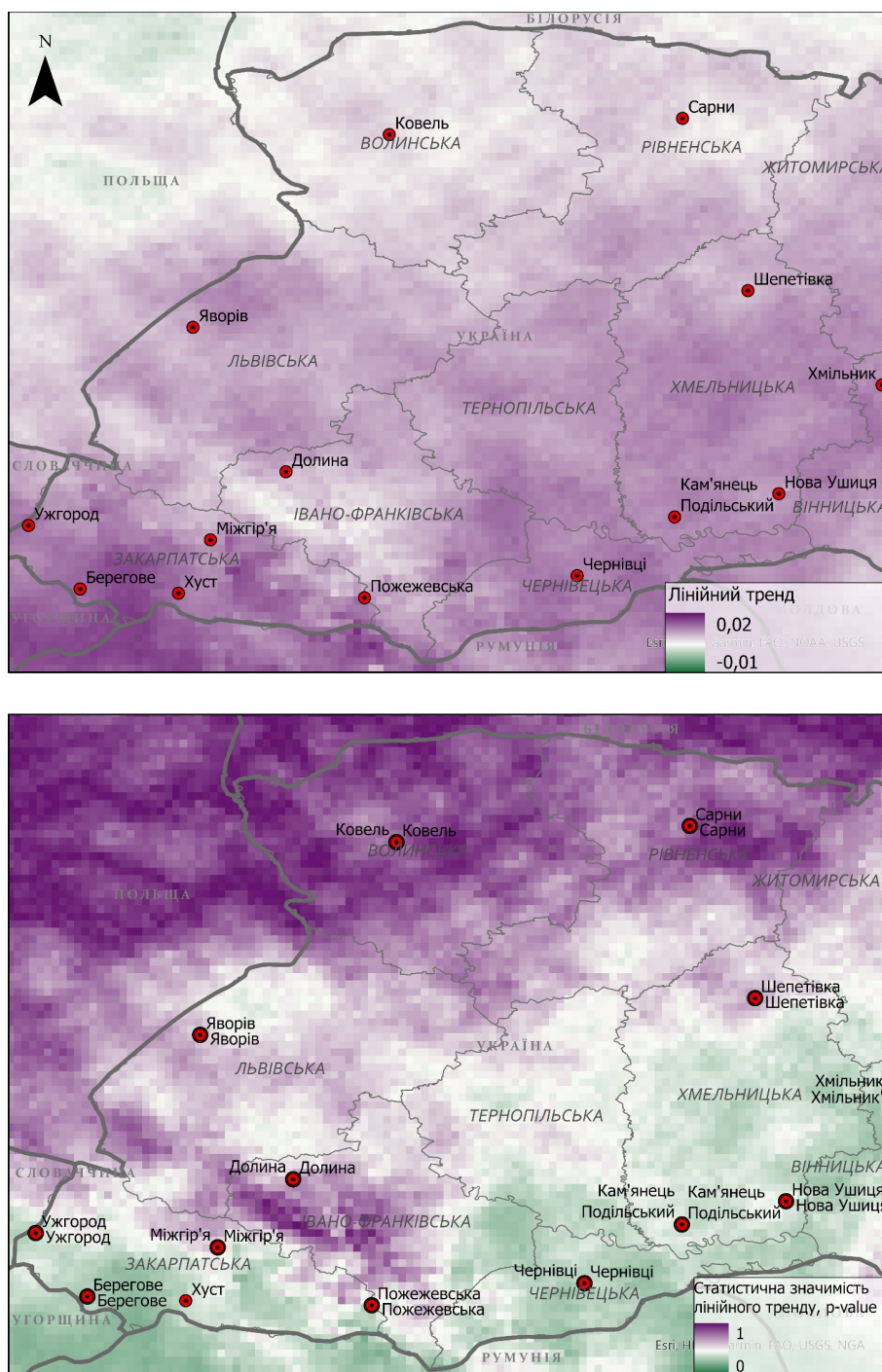


Рис. 8. Трендові зміни сумарної тривалості сонячного сйва у липні у 1991–2020 рр. на теренах Західної України: величина лінійного тренду і його статистична значимість

У розрізі місяців найсуттєвіші зміни у тривалості сонячного сйва відбулись у весняні місяці, у квітні зокрема, де виявлено найістотніше зростання тривалості сонячного сйва ($R^2 = 0,49$) (рис. 10). Екстремально сонячним видався квітень 2010-го року, як і липень, хоча у травні цього ж року було дуже мало сонячного сйва, спричинено активними фронтальними системами і, як результат, аномально високими сумами атмосферних опадів. Окрім того, у Чернівцях упродовж

Д. Холявчук, І. Марко.

Мінливість тривалості сонячного сйва на теренах Західної України

останнього десятиріччя мінливими у контексті тривалості сонячного сяйва стали осінні місяці, особливо листопад. Так, у цьому місяці спостерігали дуже мало сонячного сяйва у 2015-му (43 год) і у 2017-му (26 год) роках, що може свідчити про потепління і більше зволоження цього місяця, пов'язано з тривалішими та частішими туманами. Такі тумани активізовані в останні роки у зв'язку із зростанням забруднення атмосферного повітря транспортом і масовим використанням паливних генераторів, що потребує окремого дослідження.

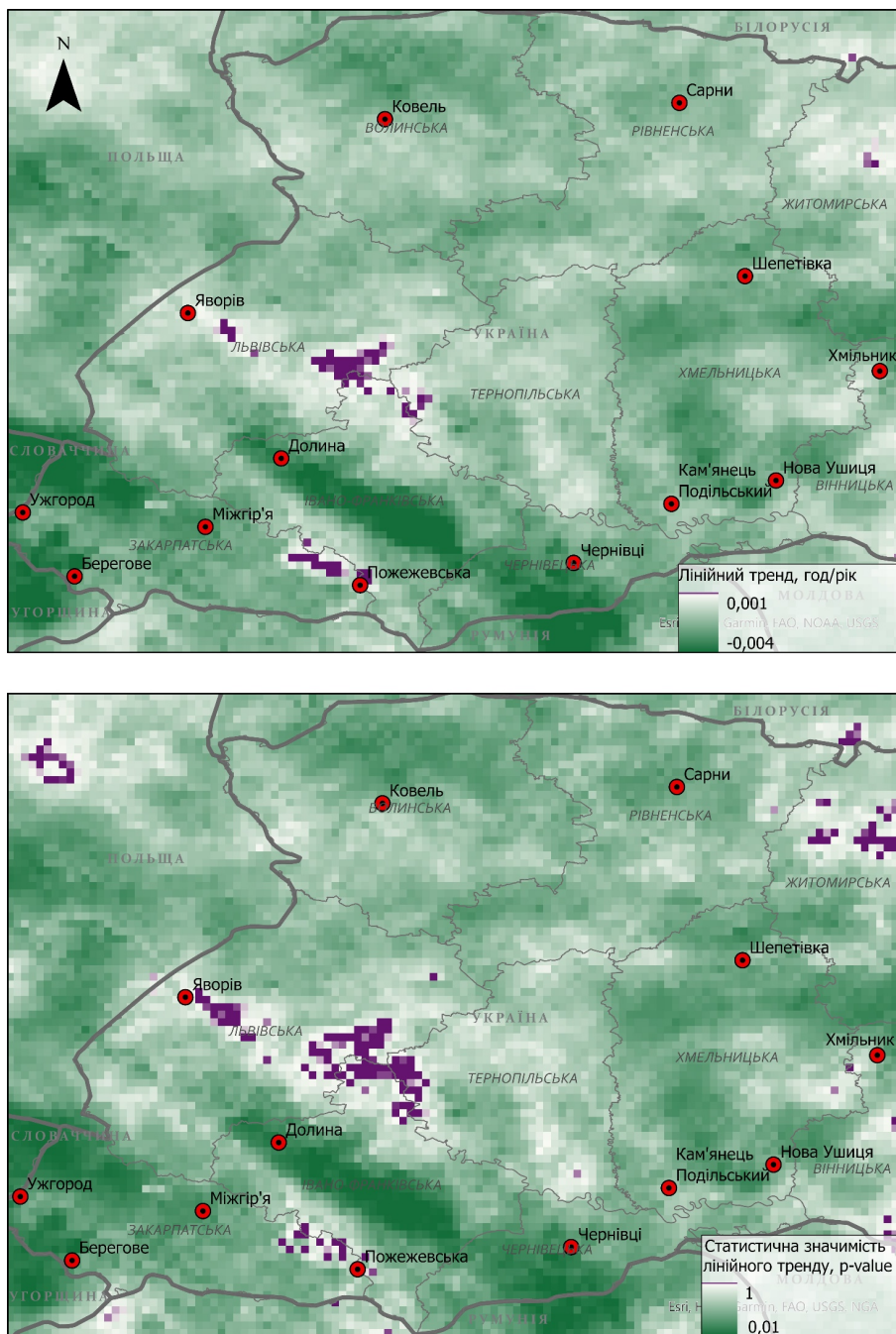


Рис. 9. Трендові зміни сумарної тривалості сонячного сяйва у січні у 1991–2020 рр. на теренах Західної України: величина лінійного тренду і його статистична значимість

4. ВИСНОВКИ

Тривалість сонячного сяйва – не лише важлива радіаційна характеристика клімату, але й індикатор мінливості регіональної атмосферної циркуляції і приземного атмосферного забруднення. Тривалі ряди наземних спостережень за допомогою геліографа дають змогу

Д. Холявчук, І. Марко.

Мінливість тривалості сонячного сяйва на теренах Західної України

виявити зміни у впливі різних кліматотвірних чинників на тлі сучасного потепління. Поява з 1980-х років точніших супутникових даних CMSAF з високою роздільною здатністю дають змогу визначити ще й просторову мінливість тривалості сонячного саява упродовж останніх десятиріч.

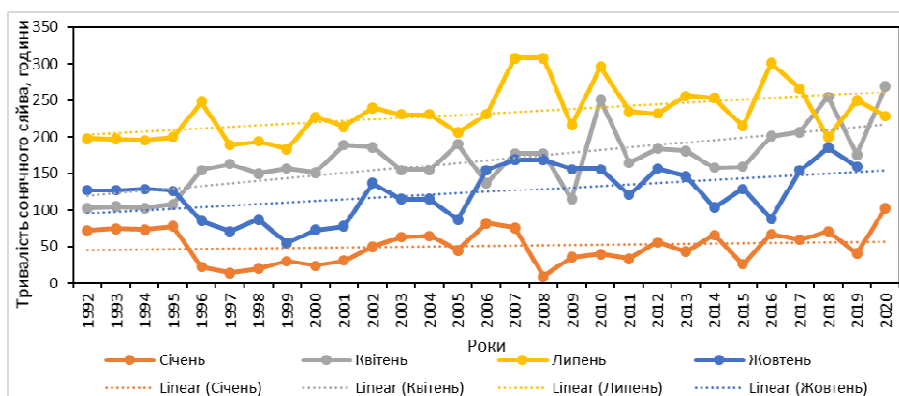


Рис. 10. Хід сумарної тривалості сонячного саява та лінійні тренди у розріз місяців у Чернівцях у 1991–2020 рр.

Упродовж останніх тридцяти років зміни тривалості сонячного саява на теренах Західної України відповідають загальноєвропейським тенденціям, пов'язаних із глобальним проясненням. Такі зміни, проте, є несуттєвими у більшості регіону упродовж року, за винятком західної частини та у січні. Просторовий розподіл тривалості сонячного саява вказує на його мінливість при наближенні до гірської системи Карпат та над височинами. Азонально, як прояв бар'єрної функції гір, тут можна спостерігати підвищення значень взимку у зв'язку з висотною диференціацією, та зниженням влітку. При цьому в літній період прослідковується чіткі меридіональні зміни в напрямку на схід від азонального впливу Карпат. Подібні закономірності у менших масштабах виявленні над Хотинською та Подільськими височинами.

Сезонний розподіл тривалості сонячного саява у Чернівцях у 1991–2020 рр. показує на значну мінливість показників у перехідні пори року (весна, осінь). У першому десятиріччі цього періоду низькі значення сумарної тривалості сонячного саява відповідали низьким значенням сонячної активності 22-го сонячного циклу. Останні два десятиріччя із значними коливаннями значень та екстремально високими значеннями в окремі роки, особливо у травні, серпні та вересні, та екстремально високим значеннями в окремі роки не співпадають з найменш активними останніми сонячними циклами, а радше свідчать про мінливість циркуляційних систем, особливо на заході регіону. Виявлення міри впливу останнього чинника, разом із зростанням атмосферного забруднення в останні роки складає перспективу наших досліджень.

ЛІТЕРАТУРА

1. Кихтенко, Я.В., Тимофєєв, В.Є. (2022). Порівняння супутникових та наземних даних спостережень тривалості сонячного саява на прикладі території України. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 3(65), 117-127. [Kykhtenko, Ya.V., Tymofieiev, V.Ie. (2022). Porivniannia suputnykovykh ta nazemnykh danykh sposterezhen tryvalosti soniachnoho siaiva na prykladi terytorii Ukrainy. *Hidrolohiia, hidrokhimiia i hidroekolohiia*, 3(65), 117-127.] <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.3.9>
2. Кліматичний кадастр України (електронна версія) (2006). Київ : Державна гідрометеорологічна служба УкрНДГМІ; Центральна Геофізична Обсерваторія. [Klimatychnyi kadastr Ukrainy (elektronna versiia) (2006). Kyiv : Derzhavna hidrometeorolohichna sluzhba UkrNDHMI; Tsentralna Heofizychna Observatoriia.]
3. Рибченко, Л.С., Савчук, С.В. (2010). Коливання тривалості сонячного саява в Україні в сучасних умовах. *Міжнародна конференція «Глобальні та регіональні зміни клімату» (Київ, 16–19 листопада 2010 р.)*. [Rybchenko, L.S., Savchuk, S.V. (2010). Kolyvannia tryvalosti soniachnoho siaiva v Ukraini v suchasnykh umovakh. *Mizhnarodna konferentsiia «Hlobalni ta rehionalni zminy klimatu» (Kyiv, 16–19 lystopada 2010 r.)*.] Джерело
4. Холявчук, Д. І. (2019). Радіаційні характеристики клімату Західної України: можливості ідентифікації змін. *Фізична географія та геоморфологія*, 94(2), 45-51. [Kholiavchuk, D.I. (2019). Radiatsiini kharakterystyky

- klimatu Zakhidnoi Ukrainy: mozhlyvosti identyfikatsii zmin. *Fizychna heohrafiia ta heomorfologhiia*, 94(2), 45-51.]. <https://doi.org/10.17721/0868-6939.2019.2.45-51>
5. Bartoszek, K. (2018). Actual sunshine duration in Poland – Comparison of satellite and ground-based measurements. *Przegląd Geofizyczny*, 63(4), 329-338.
 6. Cebulska, M., & Kholiavchuk, D. (2022). Variability of meteorological droughts in the polish and the Ukrainian Carpathians, 1984–2015. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 134(1). <https://doi.org/10.1007/s00703-021-00853-7>
 7. Dumitrescu, A., Gueymard, C.A., & Badescu, V. (2017). Reconstruction of historical aerosol optical depth time series over Romania during summertime. *International Journal of Climatology*, 37(13), 4720-4732. <https://doi.org/10.1002/joc.5118>
 8. Kazadzis, S., Founda, D., Psiloglou, B.E., Kambezidis, H., Mihalopoulos, N., Sanchez-Lorenzo, A., Meleti, C., Raptis, P.I., Pierros, F., & Nabat, P. (2018). Long-term series and trends in surface solar radiation in Athens, Greece. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(4), 2395-2411. <https://doi.org/10.5194/acp-18-2395-2018>
 9. Kholiavchuk, D. (2022). Changes in the atmospheric circulation types over western Ukraine in the 20th–21st centuries. *Visnyk Kyivskogo nacionalnogo universytetu imeni Tarasa Shevchenka, Geografiya* [Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Geography], 3/4 (84/85), 39-45., <https://doi.org/10.17721/1728-2721.2022.85.2>
 10. Kothe, S., Good, E., Obregón, A., Ahrens, B., & Nitsche, H. (2013). Satellite-based sunshine duration for Europe. *Remote Sensing*, 5(6), 2943-2972. <https://doi.org/10.3390/rs5062943>
 11. Kothe, S., Pfeifroth, U., Cremer, R., Trentmann, J., & Hollmann, R. (2017). A satellite-based sunshine duration climate data record for Europe and Africa. *Remote Sensing*, 9(5), <https://doi.org/10.3390/rs9050429>
 12. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., ... & Coud, N. (Eds.). (2021). *AR6 PSB – IPCC: Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. New York : Cambridge University Press.
 13. Matuszko, D., Bartoszek, K., Soroka, J., & Węglarczyk, S. (2020). Sunshine duration in Poland from ground- and satellite-based data. *International Journal of Climatology*, 40(9). <https://doi.org/10.1002/joc.6460>
 14. Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestad, J., Huang, J., ... & Zhang, H. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change: The Physical Science Basis*. New York : Cambridge University Press
 15. Owczarek, M., & Malinowska, M. (2023). Manual and Automatic Measurements of Sunshine Duration in Cassubian Lakeland (Northern Poland). *Atmosphere*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/atmos14020244>
 16. Parding, K., Olseth, J.A., Liepert, B.G., & Dagestad, K.-F. (2016). Influence of atmospheric circulation patterns on local cloud and solar variability in Bergen, Norway. *Theoretical and Applied Climatology*, 125(3–4), 625-639. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1517-8>
 17. Pfeifroth, U., Kothe, S., Drücke, J., Trentmann, J., Schröder, M., Selbach, N., Hollmann, R. (2023). Surface Radiation Data Set – Heliosat (SARAH) – Edition 3. *Satellite Application Facility on Climate Monitoring*. https://doi.org/10.5676/EUM_SAF_CM/SARAH/V003
 18. Power, H.C. (2003). Trends in solar radiation over Germany and an assessment of the role of aerosols and sunshine duration. *Theoretical and Applied Climatology*, 76(1–2), 47-63. <https://doi.org/10.1007/s00704-003-0005-8>
 19. Pozo-Vázquez, D., Tovar-Pescador, J., Gámiz-Fortis, S.R., Esteban-Parra, M.J., & Castro-Díez, Y. (2004). NAO and solar radiation variability in the European North Atlantic region. *Geophysical Research Letters*, 31(5), L05201 1-4. <https://doi.org/10.1029/2003gl018502>
 20. Ruckstuhl, C., & Norris, J.R. (2009). How do aerosol histories affect solar «dimming» and «brightening» over Europe?: IPCC-AR4 models versus observations. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 114(6). <https://doi.org/10.1029/2008JD011066>
 21. Sanchez-Lorenzo, A., Calbó, J., & Martin-Vide, J. (2008). Spatial and temporal trends in sunshine duration over Western Europe (1938–2004). *Journal of Climate*, 21(22), 6089-6098. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2442.1>
 22. Spinoni, J., Szalai, S., Szentimrey, T., Lakatos, M., Bihari, Z., Nagy, A., ... & Vogt, J. (2015). Climate of the Carpathian Region in the period 1961–2010: Climatologies and trends of 10 variables. *International Journal of Climatology*, 35(7), 1322-1341. <https://doi.org/10.1002/joc.4059>
 23. Urban, G., & Zajac, I. (2017). Comparison of sunshine duration measurements from Campbell-Stokes sunshine recorder and CSD1 sensor. *Theoretical and Applied Climatology*, 129(1–2), 77-87. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1762-5>
 24. Urraca, R., Gracia-Amillo, A.M., Koubli, E., Huld, T., Trentmann, J., Riihelä, A., Lindfors, A.V, Palmer, D., Gottschalg, R., & Antonanzas-Torres, F. (2017). Extensive validation of CM SAF surface radiation products over Europe. *Remote Sensing of Environment*, 199, 171-186. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.07.013>

25. Uscka-Kowalkowska, J., Kejna, M., & Maszewski, R. (2015). Influence of atmospheric circulation on sunshine duration in Konieczynka near Toruń in the years 1999-2013. *Annales Universitatis Mariae Curie-Sklodowska. Sectio B*, 70(2), 131-147. <https://doi.org/10.17951/b.2015.70.2.131>
26. Wang, K.C., Dickinson, R.E., Wild, M., & Liang, S. (2012). Atmospheric impacts on climatic variability of surface incident solar radiation. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12(20), 9581-9592. <https://doi.org/10.5194/acp-12-9581-2012>

D. Kholiavchuk, I. Marko

Variability of Sunshine Duration in Western Ukraine

Keywords: sunshine duration, climate variability, regional atmospheric circulation, atmospheric pollution, satellite data.

Annotation: The duration of sunshine is a crucial radiation characteristic of climate, serving as an indicator for both regional atmospheric circulation and surface atmospheric pollution variability. Ground observations using a heliograph, spanning a long duration, enable the detection of changes in the impact of climate-forming factors on modern warming. Since the 1980s, more precise, high-resolution CMSAF satellite data has allowed for the determination of spatial variability in sunshine duration over recent decades.

From 1371 to 1934 hours of sunshine per year were observed in Western Ukraine during 1961–1990, with the southwestern regions of the Transcarpathian lowland being the sunniest. Some years exceeded 2000 hours, indicative of a Mediterranean climate. Typical latitudinal changes were not found, but instead, a noticeable development of continentality, expressed in an increase in annual sunshine duration from west to east was found.

Over the year in 1961–1990, significant differences in sunshine duration exist. Generally, the highest values occur in July, exceeding 250 hours in the southeast, southwest, and even in the northwest. The northwest and other western weather stations show high sunlight variability in June and July, linked to North Atlantic cyclones and increased cloudiness. The lowest seasonally determined total duration of sunshine during 1961–1990 occurred in December (<50 hours), with low values and a high number of days without sunshine (up to 20 days) typical for low-mountain valleys of the Carpathians and the northwest (27–38 hours). The most complex distribution is in autumn and spring, with a well-expressed latitudinal distribution from north to south: an increase in autumn and a decrease in spring due to transformation of seasonal circulation processes.

In the last thirty years, changes in sunshine duration in Western Ukraine correspond to pan-European trends associated with global brightening. These changes are generally insignificant throughout the year, except for January and the western part of the region. In July, a slight statistically significant increase in the duration of sunshine was detected only in the west and in the foothills during 1961–2020. We associate these features with the higher frequency of anticyclonic types of weather and therefore with fewer cloudy days. These changes are noticeable in the Prut-Dniester highland and the eastern Podilska highland. The spatial distribution of sunlight duration indicates variability near the Carpathian Mountain system and above the highlands. The manifestation of the barrier function of mountains is manifested in an increase in values in winter due to altitudinal differentiation and a decrease in summer. Distinctive changes east from the influence of the Carpathians are observed in the summer period. Similar peculiarities on a smaller scale were found over the Khotyn and Podilska highlands.

The seasonal distribution of sunshine duration in Chernivtsi from 1991–2020 shows significant variability in spring and autumn. In the first decade of this period, low values corresponded to the low solar activity of the 22nd solar cycle. The last two decades, with significant fluctuations, especially in May, August, and September, and extremely high values in separate years, did not coincide with the least active recent solar cycles. Instead, they indicate the variability of circulation systems, especially in the west of the region. Identifying the impact of this factor, along with the growing atmospheric pollution in recent years, constitutes the perspective of our research.