

Оцінка місячних сум прямої та сумарної сонячної радіації на території України в період глобального потепління на початку ХХІ ст.

В.Ф. Мартазінова, Я.В. Кихтенко, В.М. Шпиг, 2025

Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України
та НАН України, Київ, Україна
Надійшла 26 січня 2025 р.

Наведено результати оцінювання сумарної та прямої сонячної радіації в літній сезон над територією України залежно від змін планетарної та регіональної циркуляції атмосфери з початку ХХІ ст. Оцінювання виконано для періоду з 1991 по 2020 р. на основі даних реаналізу ERA5, який зараз вважається одним із найкращих і є найпоширенішим у світі. Встановлено загальні тенденції щодо збільшення значень сумарної і прямої сонячної радіації над територією України. Виявлене зростання відбувається з 2001 р., що відповідає часу прояву нової регіональної циркуляції атмосфери. Потоки прямої і сумарної сонячної радіації збільшилися в середньому на 100—150 МДж/м² у другому десятилітті ХХІ ст. порівняно з останнім десятиліттям ХХ ст. Показано, що має місце синхронна зміна у часі сумарної та прямої сонячної радіації. Аналіз по окремим літнім місяцям дав змогу виявити, що найменші значення прямої сонячної радіації над територією України спостерігалися у 2001 р., а найбільші — у 2019 р. При цьому різниця місячних сум між цими роками становила 150—170 МДж/м². У липні найменші значення прямої сонячної радіації спостерігалися у 1997 р., найбільші — у 2012 р. Різниця величини місячних сум є близькою до значень у червні. У серпні найменші значення прямої сонячної радіації спостерігалися у 1997 р., а найбільші — у 2015 та 2018 рр. Різниця між сумами за місяць для цих років є близькою до значень попередніх літніх місяців. Виявлено, що у серпні підвищення сумарної і прямої сонячної радіації хоча і зберігається, як у червні та липні, проте їх значення для цього місяця вже є нижчими відносно значень двох попередніх місяців. Загалом збільшення прямої сонячної радіації над територією України визначається новими особливостями перебігу синоптичних процесів зі стійким антициклональним характером, які зумовлюють безхмарну чи малохмарну, спекотну, без опадів погоду.

Ключові слова: пряма сонячна радіація, сумарна сонячна радіація, реаналіз, загальна циркуляція атмосфери, регіональна циркуляція атмосфери, глобальне потепління, антициклонічна синоптична ситуація.

Вступ. Приземна сонячна радіація є важливою кліматичною змінною [Клімат України, 2003; Рибченко, Ревера, 2007; Slater, 2016; Yuan et al., 2021; Chakraborty, Lee, 2021] та основним джерелом енергії на Землі. Водночас вона є найперспективні-

шим екологічно чистим джерелом енергії. Коли сонячна радіація проходить через атмосферу, вона піддається різним процесам поглинання та розсіювання, внаслідок чого на поверхню Землі потрапляє менша кількість сонячної радіації. Приплив сонячної

Citation: Martazinova, V.F., Kykhtenko, Y.V., & Shpyg, V.M. (2025). Estimated monthly amounts of direct and total solar radiation in Ukraine during global warming of the early XXI century. *Geofizychnyi Zhurnal*, 47(3), 54—68. <https://doi.org/10.24028/gj.v47i3.321745>.

Publisher S. Subbotin Institute of Geophysics of NAS of Ukraine, 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

радіації на земну поверхню залежить від сезону, частини доби, широти і довготи місця. Основним чинником послаблення приземної сонячної радіації є хмарність.

Оскільки мережа наземних вимірювань сонячної радіації є нещільною, використовуються супутникові дані для отримання додаткової інформації про її просторову структуру та тимчасову мінливість. Порівняння із наземними спостереженнями з 1983 р. на всій території Європейського материка показало високу точність супутникових вимірювань приземної сонячної радіації [Schilliger et al., 2024]. Кліматичні дані щодо приземної сонячної радіації в Європі вказують на її збільшення, починаючи з 1980-х років [Cano et al., 1986; Chiacchio, Wild, 2010]. Більшість тенденцій приземної сонячної радіації викликані змінами хмарності [Jacobson, Delucchi, 2011; Correa et al., 2024].

Дослідження [Gilgen et al., 2009; Wild, 2009] підтверджують повсюдне зниження інтенсивності (на $3\text{--}9\text{ Вт/м}^2$) сумарної сонячної радіації з 1950-х по 1980-ті роки, для якого в англomовній літературі введено термін «global dimming» [Stanhill, Cohen, 2001], та подальше її збільшення в Європі з 1980-х років, для якого також введено англomовний термін «brightening».

За даними 180 європейських актинометричних станцій, в статті [Przybylak et al., 2020] було виявлено, що на території Європейського континенту на початку ХХІ ст. мало місце зростання потоків прямої сонячної радіації зі швидкістю збільшення на $8,3\text{ \%/десятиліття}$ більше, ніж це було у ХХ ст. У свою чергу розсіяна сонячна радіація за цей час зменшилася, причому швидкість таких змін була на $3,1\text{ \%/десятиліття}$ нижчою, ніж у ХХ ст. Причинами цього є зниження як концентрації аерозолів, так і загальної хмарності у поточному столітті відносно попереднього [Przybylak et al., 2020]. Як порівняти з Європейським материком, на всьому східному узбережжі Китаю за рахунок мусонної циркуляції Тихого океану [Yang et al., 2019] формується суцільний хмарний покрив улітку, що призводить до значно більшого зниження

приземних потоків сонячної радіації. Для території Східної Європи, як визначено в статті [Pfeifroth et al., 2018], протягом періоду 1983—2015 рр. найбільше значення додатної аномалії потоків сонячної радіації, зорієнтованої на горизонтальну поверхню, спостерігається в напрямку на схід від Карпатських гір. Проте для п'яти міст України (Києва, Харкова, Львова, Дніпра та Одеси) коливання розсіяної сонячної радіації незначні щодо середнього [Martazinova et al., 2023]. У статті [Шпиг, Кихтенко, 2023] показано, що впродовж 1981—2010 рр. величина сумарної сонячної радіації за рік коливалася, причому в окремі роки досить суттєво. Так, наприклад, амплітуда коливання сумарної сонячної радіації в останнє десятиліття становить близько 600 МДж/м^2 . Найбільші її значення спостерігались у період із травня по серпень, з максимальними значеннями місячних сум у червні—липні. У період календарного літа 1981—2010 рр. спостерігалася тенденція до збільшення прямої сонячної радіації. За рахунок цього на півдні України спостерігалось зростання сумарної сонячної радіації. У публікації [Zatula et al., 2021] розглянуто індекси прозорості та хмарності атмосфери на півдні України. Встановлено, що найбільша повторюваність (понад 50 %) загального хмарного покриву характеризується ступенем ясності атмосфери $0,7\text{--}0,9$, що відповідає ясному стану неба. Внаслідок цього територія на півдні України має підвищені значення прямої радіації. Розсіяна сонячна радіація перебуває у тісній оберненій залежності з індексом прозорості атмосфери (коефіцієнт кореляції становить $-0,97$), тому потоки розсіяної радіації на півдні України знижені.

Зміни приземних потоків сонячної радіації переважно зумовлені змінами прозорості атмосфери через зміни хмарності та/або зміни антропогенних аерозольних викидів [Liepert, 1997; Stanhill, Cohen, 2001; Wild, 2009, 2016]. Аерозолі були ключовим фактором у 1983—2002 рр. У період 2001—2020 рр. аерозольні ефекти значно зменшилися, а зменшенню величини сонячної радіації біля земної поверхні сприяє

наявність хмарного покриву. У публікаціях [Мартазінова та ін., 2022; Schilliger et al., 2024] показано суттєве збільшення значень характеристик сонячної радіації на території Європи та України у перші два десятиліття ХХІ ст. Період 1991—2020 рр. поділяється на два субперіоди з різною величиною прямої сонячної радіації, які узгоджуються з даними кліматичної моделі атмосферної циркуляції УкрГМІ НАН України та ДСНС України [Martazinova, 2014; Martazinova et al., 2019].

Вплив системи загальної циркуляції атмосфери Землі на потоки сонячної радіації розглянуто у публікаціях [Cubasch et al., 1997; Kejnaetal, 2012; Voigt et al., 2020]. Результатами цих досліджень стало те, що система загальної циркуляції атмосфери модифікує складові радіаційного балансу, до яких належать потоки прямої та сумарної сонячної радіації. У статті [Voigt et al., 2020] використано різні моделі взаємодії хмар, сонячної радіації та загальної циркуляції атмосфери, що підтверджує величезну роль впливу хмарності та системи

загальної циркуляції на потоки сонячної радіації.

Мета цієї статті — виявлення зміни сучасного стану прямої та сумарної сонячної радіації у літній сезон над територією України залежно від зміни загальної циркуляції атмосфери Північної півкулі з початку ХХІ ст. для подальшого прогнозу кількісних характеристик сонячної радіації на найближче десятиліття.

Матеріали і методи досліджень. Для проведення дослідження були взяті метеорологічні та кліматичні дані реаналізу ERA5 [ERA5..., 2023]. В основі цих даних лежать супутникові вимірювання з близько 90 супутникових приладів, які Європейський центр середньострокових прогнозів погоди (ECMWF) щоденно обробляє у межах оперативної діяльності із засвоєння та моніторингу даних. Вони добре узгоджуються із наземними спостереженнями як на території Європи [Schilliger et al., 2024], так і на території України [Кихтенко, Тимофєєв, 2022].

Для проведення цього дослідження

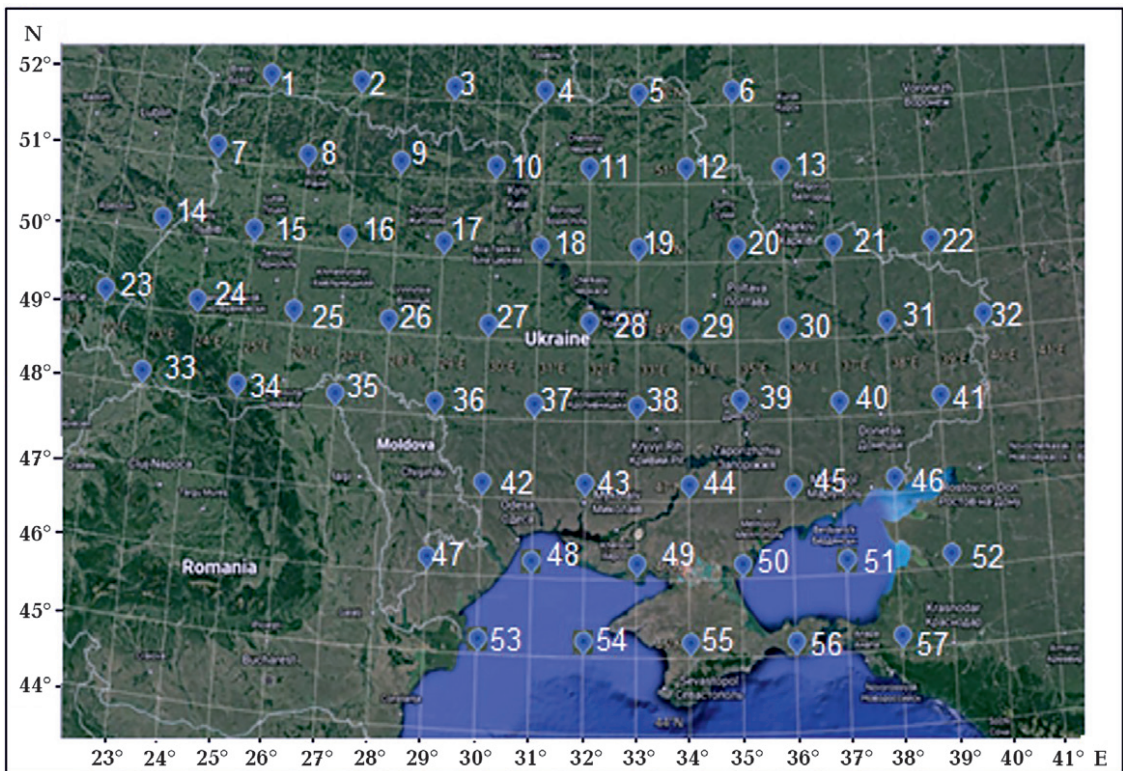


Рис. 1. Координатна сітка для території України (вузли № 1—57).

Fig. 1. Coordinate grid for the territory of Ukraine (nodes No. 1—57).

створено «розріджену» координатну сітку щодо значень місячних сум прямої та сумарної сонячної радіації за літній сезон 1991—2020 рр. по 57 вузлам сітки з кроком 2° по довготі та 1° по широті (див. рис. 1). Вузли послідовно розташовані з півночі на південь та із заходу на схід. Такі кроки сітки відрізняються від кроку сітки реаналізу ERA5 ($0,25^\circ \times 0,25^\circ$) і пояснюються необхідністю проведення оцінювання не просто потоків сонячної радіації, а їхнього взаємозв'язку із системою загальної циркуляції атмосфери Землі та, зокрема, з регіональною циркуляцією над територією України.

Як було зазначено, для виконання цього дослідження обрано період 1991—2020 рр., що відповідає зміні великомасштабної атмосферної циркуляції у Північній півкулі циркуляції з початку XXI ст. [Martazinova et al., 2019; Мартазінова та ін., 2023], зважаючи на той факт, що зміна великомасштабної атмосферної циркуляції призводить до зміни регіональної циркуляції та зміни хмарного покриву, внаслідок чого відбувається зміна потоків сумарної та прямої сонячної радіації [Pfeifroth et al., 2018].

Створено архів полів місячних сум прямої та сумарної сонячної радіації за червень, липень, серпень та за літній сезон періоду 1991—2020 рр. для території України. Архів записаний у вигляді матриці X^d (1) для літнього сезону прямої сонячної радіації та окремо для кожного з трьох літніх місяців (X_6^d, X_7^d, X_8^d). Відповідно до матриці X^d , по стовпцях відкладаються роки із 1991 по 2020 рр., по рядках — реаналізні дані місячних сум прямої сонячної радіації у 57 вузлах регулярної координатної сітки, яка була запропонована для території України. Матриця X^d записується у вигляді

де $x_{K-1,n}^d$ — значення прямої сонячної радіації в $(K-1)$ вузлі географічної сітки n -го року; d (direct) — місячна сума прямої сонячної радіації, МДж/м²; K — кількість вузлів географічної сітки території України ($K=57$) по довготі $\Delta\lambda=2^\circ$ в межах $22\text{—}40^\circ$ сх.д., та по широті $\Delta\varphi=1^\circ$ в межах $52\text{—}45^\circ$ пн.ш.; N — кількість років архіву даних прямої сонячної радіації періоду 1991—2020 рр. ($N=30$).

Матриця X^Q для сумарної сонячної радіації записується аналогічно матриці X^d . У проведеному дослідженні матриця сумарної сонячної радіації необхідна для підтвердження результатів розрахунків прямої радіації. Для матриць (X_6^Q, X_7^Q, X_8^Q), як і для матриць (X_6^d, X_7^d, X_8^d), дані реаналізу відкладаються по рядках окремо для трьох літніх місяців у 57 вузлах регулярної координатної сітки (див. рис. 1). Сезонні суми сонячної радіації X^Q та X^d є сумою їх значень за три літні місяці для кожного року періоду 1991—2020 рр.

На основі матриць місячних сум прямої та сумарної сонячної радіації за літні місяці та сезон над територією України були побудовані їх часові діаграми.

Результати проведеного дослідження та їх аналіз. Для аналізу сучасної зміни стану сонячної радіації у літній сезон над територією України побудовано часові діаграми сумарної сонячної радіації літнього сезону X^Q та для кожного літнього місяця X_6^Q, X_7^Q, X_8^Q . На рис. 2 наведено зміну сумарної сонячної радіації над територією України у червні, липні, серпні, а на рис. 3 — за літній сезон періоду 1991—2020 рр.

Зміна сумарної сонячної радіації над територією України у червні (рис. 2, а) вказує на збільшення величини сумарної радіації до останнього десятиліття. Помітне зрос-

$$X^d = \begin{bmatrix} x_{1,1}^d & x_{1,2}^d & x_{1,3}^d & \cdots & \cdots & x_{1,n}^d & \cdots & x_{1,N-1}^d & x_{1,N}^d \\ x_{2,1}^d & x_{2,2}^d & x_{2,3}^d & \cdots & \cdots & x_{2,n}^d & \cdots & x_{2,N-1}^d & x_{2,N}^d \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{K-1,1}^d & x_{K-1,2}^d & x_{K-1,3}^d & \cdots & \cdots & x_{K-1,n}^d & \cdots & x_{K-1,N-1}^d & x_{K-1,N}^d \\ x_{K,1}^d & x_{K,2}^d & x_{K,3}^d & \cdots & \cdots & x_{K,n}^d & \cdots & x_{K,N-1}^d & x_{K,N}^d \end{bmatrix}, \quad (1)$$

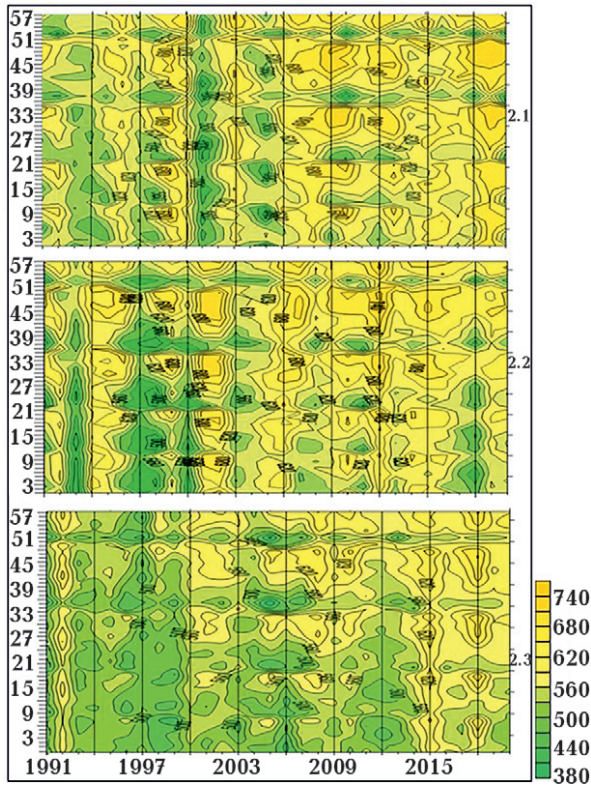


Рис. 2. Зміни сумарної сонячної радіації (МДж/м^2) на території України упродовж 1991—2020 рр.: а — у червні, б — у липні, в — у серпні.

Fig. 2. Changes of total solar radiation (MJ/m^2) over the territory of Ukraine in 1991—2020: а — June, б — July, в — August.

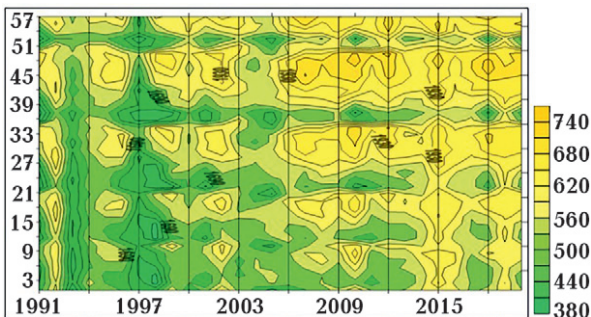


Рис. 3. Зміни сумарної сонячної радіації (МДж/м^2) на території України протягом літнього сезону упродовж 1991—2020 рр.

Fig. 3. Changes of total solar radiation (MJ/m^2) over the territory of Ukraine in summer 1991—2020.

тання радіації відзначається після 2005 р. і наприкінці періоду становить в середньому близько 700 МДж/м^2 . З 1991 до 2005 р. сумарна радіація в середньому становила близько 600 МДж/м^2 . Найнижчі значення

сумарної радіації у червні відзначалися над територією України у 2001 р., найвищі її значення припадають на 2015 та 2018 р. Різниця між значеннями становила близько $100\text{—}150 \text{ МДж/м}^2$.

Характер зміни сумарної сонячної радіації у липні (рис. 2, б) зберігає ті ж самі особливості, які зазначені вище для червня. Збільшення сумарної сонячної радіації відбувається до кінця періоду 1991—2020 рр. Найнижчі значення, зафіксовані в 1997 р., становили 500 МДж/м^2 . Найвищі значення відзначаються у 2002, 2012 і 2015 р., досягаючи у середньому близько 700 МДж/м^2 . Різниця між значеннями кінця та початку періодів становить близько $100\text{—}150 \text{ МДж/м}^2$. Водночас слід зазначити, що підвищення значень сумарної сонячної радіації у липні розпочинається на три роки раніше, ніж у червні, тобто після 2002 р.

У серпні (рис. 2, в) сумарна сонячна радіація є нижчою щодо її значень у червні та липні за рахунок зміни висоти Сонця на небосхилі, але часову динаміку зростання до кінця періоду вона зберігає аналогічно червню та липню.

Слід також зазначити, що якщо впродовж останнього десятиліття XX ст. стан сумарної радіації від місяця до місяця нестійко змінюється, то в два наступні десятиліття XXI ст. (практично у всі роки) зберігається підвищений фон сумарної сонячної радіації. На початку досліджуваного періоду значення сумарної сонячної радіації не перевищували 500 МДж/м^2 , а до кінця періоду ці значення досягли $600\text{—}650 \text{ МДж/м}^2$.

Як показано на рис. 3, сумарна радіація за літній сезон значно збільшилася до останнього десятиліття періоду 1991—2020 рр. Загалом за літній період її значення від початку до кінця розглянутого періоду зросли в середньому на $100\text{—}150 \text{ МДж/м}^2$. Зауважимо, що сумарна радіація ні червня, ні липня не визначала і не зберігала свій характер у наступні місяці (див. рис. 2).

Класифікація полів сумарної сонячної радіації над територією України за період 1991—2020 рр. Аналіз часових діаграм (див. рис. 2) показав підвищення сумарної со-

нячної радіації у всіх літніх місяцях до другого десятиліття ХХІ ст. Для підтвердження отриманого результату було проведено класифікацію стану сумарної радіації з 1991 по 2020 р. Для вирішення цього завдання було використано критерій подібності ρ [Martazinova, 2005; Мартазінова, 2022]:

$$\rho = (n_+ - n_-) / N, \quad -1 \leq \rho \leq 1, \quad (3)$$

де N — загальне число вузлів регулярної сітки території України; n_+ — число вузлів двох полів, які однакові за знаком аномалії; n_- — число вузлів, в яких знаки аномалії протилежні.

Аномалії розраховувалися як відхилення кожного члена матриці від середнього значення матриці. У результаті класифікації було визначено наступні класи, показані в табл. 1.

Із табл. 1 видно, що стан сумарної сонячної радіації можна поділити на п'ять класів із ймовірністю 40, 30, 13,3, 10 та 6,7 %. До найімовірнішого 1-го класу увійшли роки

з початку ХХІ ст., до 2-го класу наступної ймовірності — переважно роки останнього десятиліття ХХ ст. Стан сумарної сонячної радіації 2001 р. можна віднести до початку підвищення сумарної радіації на території України, а роки 3-го та 5-го класів вказують на нестійкість стану сумарної радіації у початковому періоді її підвищення. Для більш наочного розуміння подібності стану сумарної сонячної радіації між роками 1-го класу наведено в табл. 2.

Подібність стану сумарної сонячної радіації для 2-го класу відображено за допомогою ρ у табл. 3.

Подібність за ρ між полями (див. табл. 1 і 2) становить від $-0,5$ до $-0,9$. Так, наприклад, подібність сумарної радіації 1996 р. становить $-0,8$ з 2014 р., $-0,9$ з 2015 р., $-0,7$ з 2016 р., $-0,9$ з 2017 р., $-0,9$ з 2018 р., $-0,9$ з 2019 р., $-0,8$ з 2020 р. Така подібність і вказує на відмінність у стані сумарної радіації цих класів, підтверджуючи висновки з результатів розрахунків, виконаних з використанням кліматичної моделі

Таблиця 1. Класифікація стану сумарної сонячної радіації з 1991 по 2020 рр.

Клас	Роки класу											
1	1992	2001	2008	2009	2010	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
2	1991	1993	1994	1995	1996	1997	1999	2003	2004	—	—	—
3	1998	2005	2006	2007	—	—	—	—	—	—	—	—
4	2011	2012	2013	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	2000	2002	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Таблиця 2. Подібність ρ між полями сумарної сонячної радіації першого класу

ρ	1992	2001	2008	2009	2010	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
1992	1,0	0,5	0,8	0,3	0,6	0,7	0,8	0,6	0,8	0,8	0,8	0,6
2001	0,5	1,0	0,6	0,1	0,7	0,5	0,6	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6
2008	0,8	0,6	1,0	0,4	0,8	0,9	1,0	0,8	1,0	1,0	1,0	0,8
2009	0,3	0,1	0,4	1,0	0,2	0,2	0,4	0,2	0,4	0,4	0,4	0,5
2010	0,6	0,7	0,8	0,2	1,0	0,7	0,8	0,6	0,8	0,8	0,8	0,6
2014	0,7	0,5	0,9	0,2	0,7	1,0	0,9	0,7	0,9	0,9	0,9	0,7
2015	0,8	0,6	1,0	0,4	0,8	0,9	1,0	0,8	1,0	1,0	1,0	0,8
2016	0,6	0,5	0,8	0,2	0,6	0,7	0,8	1,0	0,8	0,8	0,8	0,6
2017	0,8	0,6	1,0	0,4	0,8	0,9	1,0	0,8	1,0	1,0	1,0	0,8
2018	0,8	0,6	1,0	0,4	0,8	0,9	1,0	0,8	1,0	1,0	1,0	0,8
2019	0,8	0,6	1,0	0,4	0,8	0,9	1,0	0,8	1,0	1,0	1,0	0,8
2020	0,6	0,6	0,8	0,5	0,6	0,7	0,8	0,6	0,8	0,8	0,8	1,0

Таблиця 3. Подібність ρ між полями сумарної радіації в останньому десятилітті XX та на початку XXI ст.

ρ	1991	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2003	2004
1991	1,0	1,0	0,9	0,8	0,9	1,0	0,1	1,0	0,0	0,4	0,8
1993	1,0	1,0	0,9	0,8	0,9	1,0	0,1	1,0	0,0	0,4	0,8
1994	0,9	0,9	1,0	0,8	0,8	0,9	0,1	0,9	0,1	0,4	0,7
1995	0,8	0,8	0,8	1,0	0,7	0,8	-0,1	0,8	0,2	0,2	0,8
1996	0,9	0,9	0,8	0,7	1,0	0,9	0,0	0,9	0,0	0,3	0,8
1997	1,0	1,0	0,9	0,8	0,9	1,0	0,1	1,0	0,0	0,4	0,8
1999	1,0	1,0	0,9	0,8	0,9	1,0	0,1	1,0	0,0	0,4	0,8
2003	0,4	0,4	0,4	0,2	0,3	0,4	0,1	0,4	0,4	1,0	0,2
2004	0,8	0,8	0,7	0,8	0,8	0,8	0,0	0,8	0,2	0,2	1,0

[Martazinova, 2014; Martazinova et al., 2019], про зміну великомасштабної та, як наслідок, регіональної атмосферної циркуляції з початку XXI ст.

Зміна у часі прямої сонячної радіації у літні місяці над територією України з 1991 по 2020 р. Порівняння часових діаграм сумарної та прямої сонячної радіації показало наступні результати. Сумарна сонячна радіація (див. рис. 2, 3) до останнього десятиліття збільшилась у кожному літньому місяці та загалом за літній сезон над територією України. Розглянемо зміну прямої сонячної радіації, щоб визначити її зміни щодо змін сумарної радіації. Для чого побудуємо часові діаграми прямої сонячної радіації окремо для червня, липня та серпня з 1991 до 2020 р. На рис. 4 показано часові діаграми стану прямої радіації для кожного літнього місяця.

У червні (рис. 4, а) найменші значення прямої сонячної радіації над територією України спостерігаються у 2001 р., а найбільші — у 2019 р. Після 2001 р. відзначається поступове збільшення прямої радіації над територією України рік у рік, досягаючи найбільших значень практично у всіх 57 вузлах регулярної географічної сітки у 2019 р. Різниця між 2001 та 2019 р. становила 150—170 МДж/м². Зростання сумарної сонячної радіації над територією України у червні (див. рис. 2, а) до останнього десятиліття збігається зі зростанням прямої сонячної радіації червня на території України.

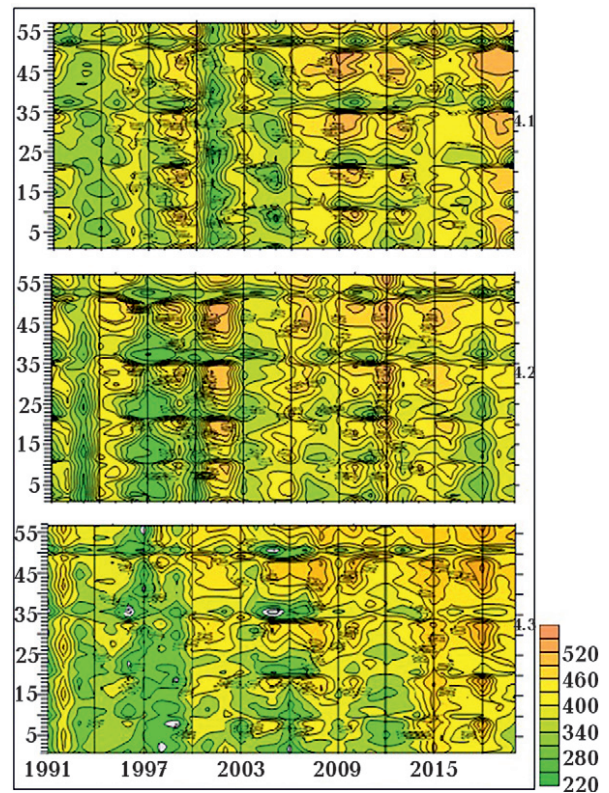


Рис. 4. Стан прямої сонячної радіації (МДж/м²) над територією України упродовж 1991—2020 рр.: а — у червні, б — у липні, в — у серпні.

Fig. 4. State of direct solar radiation (MJ/m²) over the territory of Ukraine in 1991—2020: а — June, б — July, в — August.

У липні (рис. 4, б) зберігається підвищений стан прямої радіації до кінця взятого періоду, як у червні. Підвищення прямої радіації у липні спостерігається із 2001 р. Найменші значення прямої сонячної раді-

ації спостерігалися у 1997 р., найбільші — у 2012 р. Різниця між 1997 та 2012 р. залишається близькою до червневої.

У серпні (рис. 4, в) також зберігається підвищення прямої сонячної радіації, як у червні та липні. Проте значення прямої радіації для цього місяця є нижчими щодо значень червня і липня. Це пояснюється зміною кута падіння сонячних променів та зменшенням тривалості світлового дня для цього місяця. У липні та серпні 1997 р. спостерігалися найменші значення прямої сонячної радіації. Цей факт пов'язаний з тим, що літо було холодним і дощовим. Найбільші значення прямої сонячної радіації у серпні спостерігалися у 2015 та 2018 р. Розбіжність значень прямої сонячної радіації між 1997 та 2018 р. залишається близькою до різниці попередніх літніх місяців.

Більш повну картину щодо просторово-часових змін прямої сонячної радіації на території України показано на рис. 5. Чітко видно підвищення прямої сонячної радіації впродовж перших двох десятиліть поточного століття. Порівняння рис. 3 та 5 показує схожість у зміні сумарної та прямої сонячної радіації, що вказує на збільшення вкладу прямої радіації у сумарну.

Для більш повного аналізу стану прямої сонячної радіації над територією України з початку ХХІ ст. були розраховані відхилення прямої сонячної радіації для кожного вузла сітки (див. рис. 1). Для цього були

розраховані середні значення прямої сонячної радіації по кожному вузлу координатної сітки за період 1991—2020 рр.:

$$\bar{X}_k^d = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_{k,n}^d, \quad (4)$$

де $k=1 \div K$, $K=57$ вузлів географічної сітки, $n=1 \div N$, $N=30$ років.

Відхилення значень прямої сонячної радіації від середнього $\bar{X}_k^d$ у кожному k -му вузлі кожного року n підтвердило результат дослідження про підвищення прямої радіації над територією України з початку ХХІ ст.

На рис. 6, як приклад, для серпня наводиться часова діаграма відхилення значень прямої радіації від середнього у вузлах для кожного року. Видно, що впродовж 1991—2000 рр. для прямої сонячної радіації відхилення від середнього на території України має переважно від'ємні значення: від -20 до -100 МДж/м². Упродовж 2001—2010 рр. мали місце перехідні роки, коли для прямої радіації в окремих вузлах зберігалися від'ємні значення відхилення. До кінця другого десятиліття ХХІ ст. пряма сонячна радіація досягла збільшення відхилення від середнього на 60 — 100 МДж/м².

Збільшення прямої сонячної радіації також відзначалося і в серпні 2024 р., коли погодні умови над територією України характеризувалися тривалим впливом баричних утворень із підвищеним атмосферним тиском. Дні були спекотними і без опадів, стан небосхилу — безхмарним або в окремі дні — малохмарним.

Порівняння перевищення прямої сонячної радіації на кінець періоду 1991—2020 рр. як складової сумарної сонячної радіації одночасно зі станом прямої та розсіяної радіації в цей же період наведено на рис. 7. Для побудови графіків розраховано середні значення сумарної, прямої та розсіяної радіації по території України за кожен рік періоду 1991—2020 рр.

Синхронна зміна у часі кривих сумарної та прямої радіації доводить, що зростання сумарної радіації відбувається через зростання прямої радіації над територією

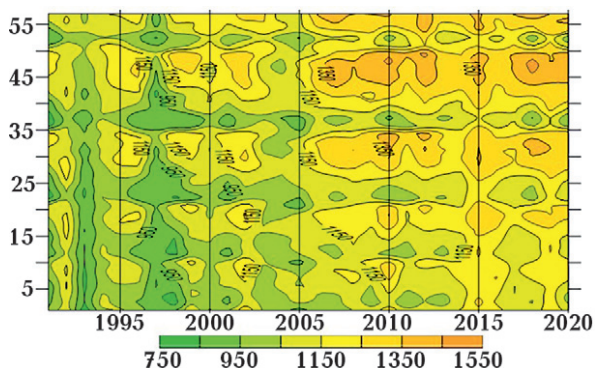


Рис. 5. Стан прямої сонячної радіації (МДж/м²) над територією України протягом літнього сезону 1991—2020 рр.

Fig. 5. State of direct solar radiation (MJ/m²) over the territory of Ukraine in summer 1991—2020.

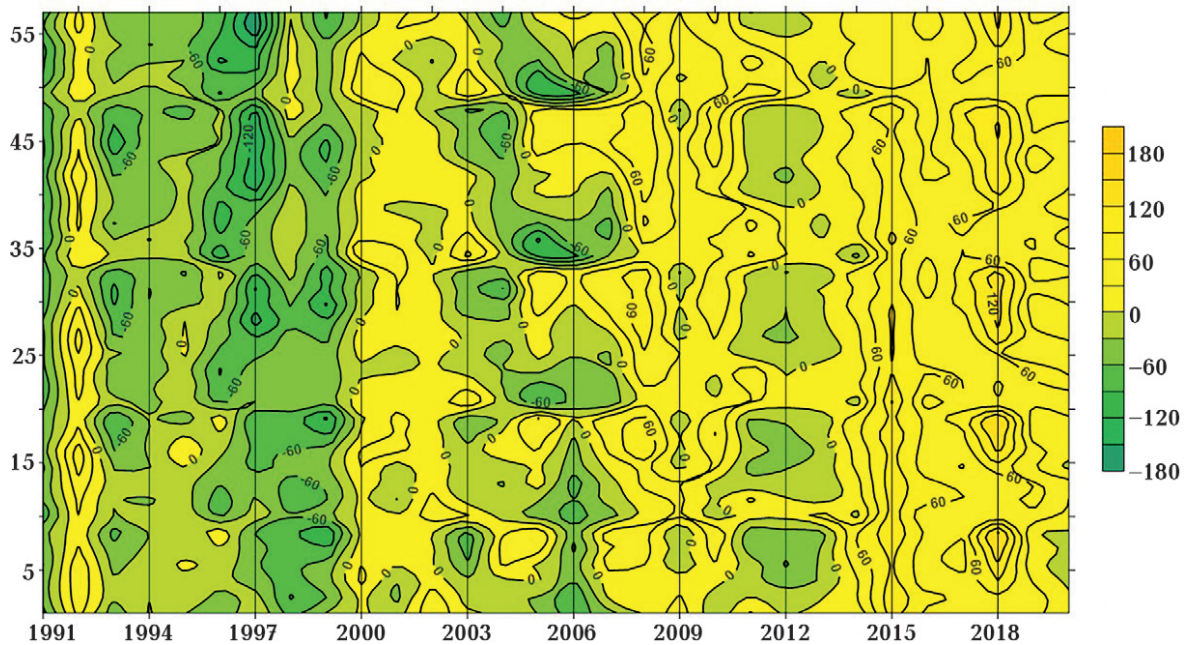


Рис. 6. Відхилення прямої сонячної радіації (МДж/м^2) від середнього значення у вузлах регулярної сітки над територією України в серпні 1991—2020 рр.

Fig. 6. Deviation of direct solar radiation (MJ/m^2) from the average value at regular grid nodes over the territory of Ukraine in August 1991—2020.

України. Зменшення величини розсіяної радіації після 2009 р. могло б бути значно більшим, якби погодні умови мали циклональний характер (за рахунок впливу хмарності). Але синоптична ситуація переважно складалася з антициклонічних баричних утворень [Мартазінова та ін., 2022; Schilliger et al., 2024]. Величину та особливості просторового розподілу в полі розсіяної сонячної радіації формувала малохмарність малорухливого антициклону в останні десятиліття.

Висновки. Проведений у межах цього дослідження аналіз щодо змін приземної сонячної радіації на території України в літній сезон, відповідно до поточної регіональної атмосферної циркуляції початку XXI ст., показав наявність відмінностей у розподілі по території сумарної сонячної радіації літнього сезону останнього десятиліття XX ст. порівняно з першими двома десятиліттями XXI ст. Виявлено значне збільшення сумарної радіації в літній сезон упродовж 2011—2020 рр., що підтверджує результати [Schilliger et al., 2024] щодо зростання сонячної радіації на території

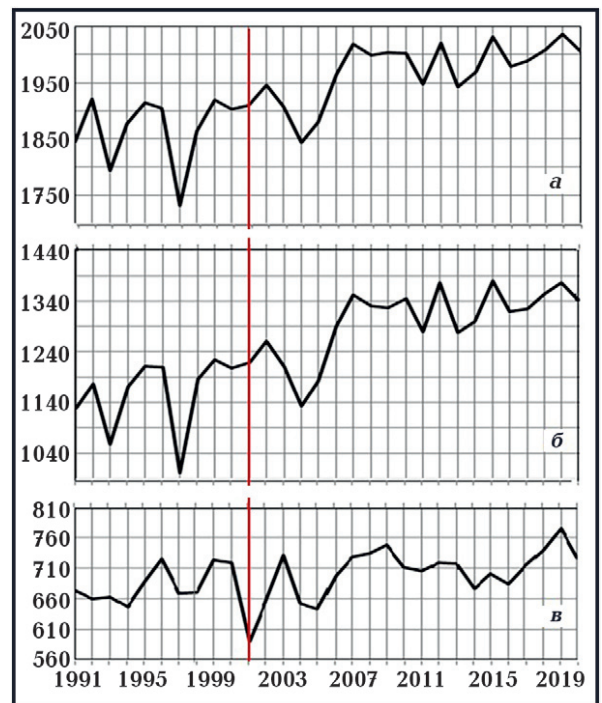


Рис. 7. Середні значення сумарної (а), прямої (б) та розсіяної (в) сонячної радіації над територією України упродовж літнього сезону 1991—2020 рр.

Fig. 7. Average values of total (a), direct (b) and diffuse (c) solar radiation over the territory of Ukraine during the summer 1991—2020.

Європи з початку ХХІ ст. Внаслідок змін великомасштабної та регіональної циркуляцій з початку нинішнього століття спостерігається значне зростання антициклонічної діяльності на території України, яка має малохмарну, спекотну, без опадів погоду. Як наслідок, формується значне зростання прямої сонячної радіації, що, у свою чергу, зумовлює суттєве збільшення сумарної радіації на фоні зменшення розсіяної сонячної радіації упродовж перших двох десятиліть ХХІ ст.

Розраховані середні по території України значення приземної сумарної, прямої та розсіяної сонячної радіації для кожного року вибраного періоду показали синхронну зміну в часі сумарної та прямої со-

нячної радіації. Це вказує на збільшення сумарної радіації за рахунок вкладу прямої радіації. Варто вказати на збереження тенденції щодо збільшення значень прямої сонячної радіації у поточному десятилітті, що підтверджується продовженням зростання її значень до літнього сезону 2024 р. Вочевидь, при цьому будуть спостерігатися посушливі та спекотні погодні умови. Збільшення значень сонячної радіації також призведе до значного зменшення вологи у ґрунті. Також можна припустити, що зниження значень розсіяної сонячної радіації продовжуватиметься за рахунок зменшення хмарності (і відповідно її впливу) або згодом стабілізується на певному рівні.

Список літератури

- Кихтенко Я.В., Тимофєєв В.Є. Порівняння супутникових та наземних даних спостережень тривалості сонячного сйва на прикладі території України. *Гідрологія, гідрохімія і ригроекологія*. 2022. № 3(65). С. 117—127. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.3.9>.
- Клімат України. За ред. В.М. Ліпінського, В.А. Дячука, В.М. Бабіченко. Київ: Видавництво Раєвського, 2003, 344 с.
- Мартазінова В.Ф. *Метод «Плаваючого аналога» для довгострокового прогнозу погоди*. Одеса: Гельветика, 2022, 127 с.
- Мартазінова В.Ф., Городецька Н.С., Рибченко Л.С., Савчук С.В., Гребенюк Н.П., Татарчук О.Г. Особливості температурно-вологісного режиму території України з початку ХХІ сторіччя під впливом змін великомасштабної атмосферної циркуляції. *Метеорологія. Гідрологія. Моніторинг довкілля*. 2022. № 2. С. 22—34.
- Мартазінова В., Ставнічук В., Корнієнко Є. *Сучасні зміни клімату на заході України від початку ХХІ століття*. Одеса: Гельветика, 2023, 80 с.
- Рибченко Л.С., Ревера Т.О. Сумарна сонячна радіація та альbedo підстильної поверхні в Україні. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2007. Вип. 256. С. 99—112.
- Рибченко Л.С., Савчук С.В. Визначення змін складових радіаційного режиму сонячної радіації за 1991—2020 рр. відносно 1961—1990 рр. в Україні. *Гідрологія, гідрохімія і ригроекологія*. 2022. № 3(65). С. 96—104. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.3.7>.
- Шпиг В.М., Кихтенко Я.В. Багаторічний хід сумарної сонячної радіації у місті Херсоні. *Матеріали VI Міжнар. наук.-практ. конф. «Екологічний стан навколишнього середовища та раціональне природокористування в контексті сталого розвитку» (26—27 жовтня 2023, м. Херсон)*. Одеса: Олді+, 2023, С. 203—206.
- Cano, D., Monget, J., Albuissou, M., Guillard, H., Regas, N., & Wald, L. (1986). A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy Journal*, 37(1), 31—39. [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(86\)90104-0](https://doi.org/10.1016/0038-092x(86)90104-0).
- Chiacchio, M., & Wild, M. (2010). Influence of NAO and clouds on long-term seasonal variations of surface solar radiation in Europe. *Journal of Geophysical Research*, 115(D10), 17. <https://doi.org/10.1029/2009JD012182>.
- Chakraborty, T., & Lee, X. (2021). Large Differences in Diffuse Solar Radiation among Current-Generation Reanalysis and Satellite-Derived Products. *Journal of Climate*, 34(16), 6635—650. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0979.s1>.
- Correa, L., Folini, D., Chtirkova, B., & Wild, M.

- (2024). Causes for decadal trends in surface solar radiation in the alpine region in the 1981–2020 period. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129(9), 21. <https://doi.org/10.1029/2023JD039998>.
- Cubasch, U., Voss, R., Hegerl, G.C., Waszkewitz, J., & Crowley, T.J. (1997). Simulation of the influence of solar radiation variations on the global climate with an ocean — atmosphere general circulation model. *Climate Dynamics Journal*, 13, 757–767. <https://doi.org/10.1007/s003820050196>.
- ERA5: data documentation. (2023). Retrieved from <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation>.
- Gilgen, H., Roesch, A., Wild, M., & Ohmura, A. (2009). Decadal changes in shortwave irradiance at the surface in the period from 1960 to 2000 estimated from Global Energy Balance Archive Data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D10), 12. <https://doi.org/10.1029/2008JD011383>.
- He, Y., Wang, K., & Feng, F. (2021). Improvement of ERA5 over ERA-Interim in Simulating Surface Incident Solar Radiation throughout China. *Journal of Climate*, 34(10), 3853–3867. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0300.s1>.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
- Jacobson, M.Z., & Delucchi, M.A. (2011). Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. *Energy Policy*, 39(3), 1154–1169. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.11.040>.
- Kejna, M., Przybylak, R., & Arazny, A. (2012). The Influence of Cloudiness and Synoptic Situations on the Solar Radiation Balance in the Area of Kaffiøyra (Nw Spitsbergen) in the Summer Seasons 2010 and 2011. *Bulletin of Geography. Physical Geography Series*, 5, 77–95. <https://doi.org/10.2478/v10250-012-0005-6>.
- Liepert, B.G. (1997). Recent changes in solar radiation under cloudy conditions in Germany. *International Journal of Climatology*, 17(14), 1581–1593. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(19971130\)17:14<1581::AID-JOC214>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(19971130)17:14<1581::AID-JOC214>3.0.CO;2-H).
- Loew, A., Andersson, A., Trentmann, J., & Schroder, M. (2016). Assessing Surface Solar Radiation Fluxes in the CMIP Ensembles. *Journal of Climate*, 29(20), 7231–7246. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00503.1>.
- Martazinova, V. (2014). Change of the Large-Scale Atmospheric Circulation over the North Hemisphere During 1900–2010. *Article-poster. AGU Fall Meeting, 15–19 December 2014, San Francisco, CA, USA*.
- Martazinova, V. (2005). The Classification of Synoptic Patterns by Method of Analogs. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 7, 61–65.
- Martazinova, V., Bakhmutov, V., & Melnyk, G. (2019). Variability of Atmospheric Circulation and Geomagnetic Field in the Northern Hemisphere. *Article-poster. AGU Fall Meeting, 9–13 December 2019, San Francisco, CA, USA*. <https://doi.org/10.1002/essoar.10501262.1>.
- Martazinova, V., Shpyg, V., & Kykhtenko, Y. (2023). Analysis of solar radiation changes in large cities of Ukraine in the summer period. *Book of Abstracts of the International Conference of Young Scientists on Meteorology, Hydrology and Environmental Monitoring (ICYS-MHEM)*, 21. <https://doi.org/10.15407/icys-mhem.2023.021>.
- Pfeifroth, U., Sanchez-Lorenzo, A., Manara, V., Trentmann, J., & Hollmann, R. (2018). Trends and variability of surface solar radiation in Europe based on surface-and satellite-based data records. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(3), 1735–1754. <https://doi.org/10.1002/2017JD027418>.
- Przybylak, R., Svyashchennikov, P.N., Uscka-Kowalkowska, J., & Wyszynski, P. (2020). Solar Radiation in the Arctic during the Early Twentieth-Century Warming (1921–50): Presenting a Compilation of Newly Available Data. *Journal of Climate*, 34(1), 21–37. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0257.s1>.
- Schilliger, L., Tetzlaff, A., Bourgeois, Q., Correa, L., & Wild, M. (2024). An investigation on causes of the detected surface solar radiation brightening in Europe using satellite data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129(15), 21. <https://doi.org/10.1029/2024JD041101>.

- Slater, A.G. (2016). Surface Solar Radiation in North America: A Comparison of Observations, Reanalyses, Satellite, and Derived Products. *Journal of Hydrometeorology*, 17(1), 401—420. <http://dx.doi.org/10.1175/JHM-D-15-0087.s1>.
- Stanhill, G., & Cohen, S. (2001). Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. *Agricultural and Forest Meteorology Journal*, 107(4), 255—278. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00241-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00241-0).
- Tavolato, C., & Isaksen, L. (2015). On the use of a Huber norm for observation quality control in the ECMWF 4D-Var. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141, 1514—1527. <https://doi.org/10.1002/qj.2440>.
- Voigt, A., Albern, N., Ceppi, P., Grise, K., Li, Y., & Medeiros, B. (2020). Clouds, radiation, and atmospheric circulation in the present — day climate and under climate change. *WIREs Climate Change*, 12(2), 22. <https://doi.org/10.1002/wcc.694>.
- Wild, M. (2016). Decadal changes in radiative fluxes at land and ocean surfaces and their relevance for global warming. *WIREs Climate Change*, 7(1), 91—107. <https://doi.org/10.1002/wcc.372>.
- Wild, M. (2009). Global dimming and brightening: A review. *Journal of Geophysical Research*, 114(D00D16), 31. <http://doi:10.1029/2008JD011470>.
- Yang, S., Wang, X.L., & Wild, M. (2019). Causes of Dimming and Brightening in China Inferred from Homogenized Daily Clear-Sky and All-Sky in Situ Surface Solar Radiation Records (1958—2016). *Journal of Climate*, 32(18), 5901—5913. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0666.1>.
- Yuan, M., Leirvik, T., & Wild, M. (2021). Global Trends in Downward Surface Solar Radiation from Spatial Interpolated Ground Observations during 1961—2019. *Journal of Climate*, 34(23), 9501—9521. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0165.s1>.
- Zatula, V.I., Kyhtenko, Ya.V., Oliinyk, R.V., & Snizhko, S.I. (2021). Evaluation of atmosphere clearness and cloudiness parameters in the southern regions of Ukraine using statistical analysis. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series «Geology. Geography. Ecology»*, (55), 159—173. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-12>.

Estimated monthly amounts of direct and total solar radiation in Ukraine during global warming of the early XXI century

V.F. Martazinova, Y.V. Kykhtenko, V.M. Shpyg, 2025

Ukrainian Hydrometeorological Institute of the State Emergency Service of Ukraine and the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

In this article, the results of the estimation of total and direct solar radiation in the summer season over the territory of Ukraine depending on changes in planetary and regional atmospheric circulation since the beginning of the 21st century are presented. The estimation was conducted for the period from 1991 to 2020 based on the ERA5 reanalysis data, which is currently considered one of the best and most widely used models. General trends in the increase in the values of total and direct solar radiation over the territory of Ukraine have been established. The detected increase has been occurring since 2001, which corresponds to the time of display of a new regional atmospheric circulation. The amounts of direct and total solar radiation increased on average by 100—150 MJ/m² in the second decade of the 21st century compared to the last decade of the 20th century.

There is a synchronous change in total and direct solar radiation. Analysis of individual summer months revealed that the lowest values of direct solar radiation over the territory of Ukraine were observed in 2001 and the highest in 2019. At the same time, the difference in monthly sums between these years was 150—170 MJ/m². In July, the lowest values of direct solar radiation were observed in 1997, and the highest values in 2012. The difference in monthly sums is close to the values of June. In August, the lowest values of direct solar radiation were observed in 1997 and the highest in 2015 and 2018. The difference between the sums per month for these years is close to the values of the previous summer months. In August, although the increase in total and direct solar radiation persists, as in June and July, their values for this month are already lower than those of the two previous months. In general, the increase in direct solar radiation over the territory of Ukraine is determined by new features of the course of synoptic processes with a stable anticyclonic character, which cause cloudless or partly cloudy, hot weather without precipitation.

Key words: direct solar radiation, total solar radiation, reanalysis, general atmospheric circulation, regional atmospheric circulation, global warming, anticyclonic synoptic situation.

References

- Kykhtenko, Ya.V., & Tymofieiev, V.Ie. (2022). Comparison of satellite and terrestrial data of observations of sunshine duration on the example of the territory of Ukraine. *Hidrolohiia, hidrokhiimiia i hidroekolohiia*, (3), 117—127. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.3.9> (in Ukrainian).
- Lipinskiy, V.M., Diachuk, V.A., & Babichenko, V.M. (2003). *Climate of Ukraine*. Kyiv: Raevsky Publ. House, 344 p. (in Ukrainian).
- Martazinova, V.F. (2022). *Floating analog method for long-term weather forecast*. Odesa: Helvetica, 127 p. (in Ukrainian).
- Martazinova, V.F., Horodetska, N.S., Rybchenko, L.S., Savchuk, S.V., Hrebeniuk, N.P., & Tarchuk, O.H. (2022). Features of the temperature and humidity regime of the territory of Ukraine since the beginning of the 21st century under the influence of changes in large-scale atmospheric circulation. *Meteorology. Hydrology. Environmental Monitoring*, (2), 22—34 (in Ukrainian).
- Martazinova, V., Stavnichuk, V., & Korniienko, Ye. (2023). Modern climate changes in western Ukraine since the beginning of the 21st century. Odesa: Helvetica, 80 p. (in Ukrainian).
- Rybchenko, L.S., & Revera, T.O. (2007). Total solar radiation and subsurface albedo in Ukraine. *Nauk. Pratsi UkrNDHMI*, (256), 99—112 (in Ukrainian).
- Rybchenko, L.S., & Savchuk, S.V. (2022). Determination of changes in the component radiation regime of solar radiation for 1991-2020 years in relation to 1961-1990 years in Ukraine. *Hidrolohiia, Hidrokhiimiia i Hidroekolohiia*, (3), 96—104. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.3.7> (in Ukrainian).
- Shpyg, V.M., & Kykhtenko, Ya.V. (2023). Multi-year course of total solar radiation in the city of Kherson. *Materials of the VI Int. Sci. and Pract. Conf. «Ecological condition of the Environment and Rational Nature Management in the Context of Sustainable Development»* (pp. 203—206). Odesa: Oldi+ (in Ukrainian).
- Cano, D., Monget, J., Albuissou, M., Guillard, H., Regas, N., & Wald, L. (1986). A method for the determination of the global solar radiation from meteorological satellite data. *Solar Energy Journal*, 37(1), 31—39. [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(86\)90104-0](https://doi.org/10.1016/0038-092x(86)90104-0).
- Chiacchio, M., & Wild, M. (2010). Influence of NAO and clouds on long-term seasonal variations of surface solar radiation in Europe. *Journal of Geophysical Research*, 115(D10), 17. <https://doi.org/10.1029/2009JD012182>.
- Chakraborty, T., & Lee, X. (2021). Large Differences in Diffuse Solar Radiation among Current-Generation Reanalysis and Satellite-Derived Products. *Journal of Climate*, 34(16), 6635—650. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0979.s1>.
- Correa, L., Folini, D., Chtirkova, B., & Wild, M. (2024). Causes for decadal trends in surface

- solar radiation in the alpine region in the 1981–2020 period. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129(9), 21. <https://doi.org/10.1029/2023JD039998>.
- Cubasch, U., Voss, R., Hegerl, G.C., Waszkewitz, J., & Crowley, T.J. (1997). Simulation of the influence of solar radiation variations on the global climate with an ocean — atmosphere general circulation model. *Climate Dynamics Journal*, 13, 757–767. <https://doi.org/10.1007/s003820050196>.
- ERA5: data documentation. (2023). Retrieved from <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation>.
- Gilgen, H., Roesch, A., Wild, M., & Ohmura, A. (2009). Decadal changes in shortwave irradiance at the surface in the period from 1960 to 2000 estimated from Global Energy Balance Archive Data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D10), 12. <https://doi.org/10.1029/2008JD011383>.
- He, Y., Wang, K., & Feng, F. (2021). Improvement of ERA5 over ERA-Interim in Simulating Surface Incident Solar Radiation throughout China. *Journal of Climate*, 34(10), 3853–3867. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0300.s1>.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.
- Jacobson, M.Z., & Delucchi, M.A. (2011). Providing all global energy with wind, water, and solar power, Part I: Technologies, energy resources, quantities and areas of infrastructure, and materials. *Energy Policy*, 39(3), 1154–1169. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.11.040>.
- Kejna, M., Przybylak, R., & Arazny, A. (2012). The Influence of Cloudiness and Synoptic Situations on the Solar Radiation Balance in the Area of Kaffiøyra (Nw Spitsbergen) in the Summer Seasons 2010 and 2011. *Bulletin of Geography. Physical Geography Series*, 5, 77–95. <https://doi.org/10.2478/v10250-012-0005-6>.
- Liepert, B.G. (1997). Recent changes in solar radiation under cloudy conditions in Germany. *International Journal of Climatology*, 17(14), 1581–1593. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(19971130\)17:14<1581::AID-JOC214>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(19971130)17:14<1581::AID-JOC214>3.0.CO;2-H).
- Loew, A., Andersson, A., Trentmann, J., & Schroder, M. (2016). Assessing Surface Solar Radiation Fluxes in the CMIP Ensembles. *Journal of Climate*, 29(20), 7231–7246. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00503.1>.
- Martazinova, V. (2014). Change of the Large-Scale Atmospheric Circulation over the North Hemisphere During 1900–2010. *Article-poster. AGU Fall Meeting, 15–19 December 2014, San Francisco, CA, USA*.
- Martazinova, V. (2005). The Classification of Synoptic Patterns by Method of Analogs. *Journal of Environmental Science and Engineering*, 7, 61–65.
- Martazinova, V., Bakhmutov, V., & Melnyk, G. (2019). Variability of Atmospheric Circulation and Geomagnetic Field in the Northern Hemisphere. *Article-poster. AGU Fall Meeting, 9–13 December 2019, San Francisco, CA, USA*. <https://doi.org/10.1002/essoar.10501262.1>.
- Martazinova, V., Shpyg, V., & Kykhtenko, Y. (2023). Analysis of solar radiation changes in large cities of Ukraine in the summer period. *Book of Abstracts of the International Conference of Young Scientists on Meteorology, Hydrology and Environmental Monitoring (ICYS-MHEM)*, 21. <https://doi.org/10.15407/icys-mhem.2023.021>.
- Pfeifroth, U., Sanchez-Lorenzo, A., Manara, V., Trentmann, J., & Hollmann, R. (2018). Trends and variability of surface solar radiation in Europe based on surface-and satellite-based data records. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(3), 1735–1754. <https://doi.org/10.1002/2017JD027418>.
- Przybylak, R., Svyashchennikov, P.N., Uscka-Kowalkowska, J., & Wyszynski, P. (2020). Solar Radiation in the Arctic during the Early Twentieth-Century Warming (1921–50): Presenting a Compilation of Newly Available Data. *Journal of Climate*, 34(1), 21–37. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0257.s1>.
- Schilliger, L., Tetzlaff, A., Bourgeois, Q., Correa, L., & Wild, M. (2024). An investigation on causes of the detected surface solar radiation brightening in Europe using satellite data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129(15), 21. <https://doi.org/10.1029/2024JD041101>.
- Slater, A.G. (2016). Surface Solar Radiation in North America: A Comparison of Observations,

- Reanalyses, Satellite, and Derived Products. *Journal of Hydrometeorology*, 17(1), 401—420. <http://dx.doi.org/10.1175/JHM-D-15-0087.s1>.
- Stanhill, G., & Cohen, S. (2001). Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. *Agricultural and Forest Meteorology Journal*, 107(4), 255—278. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(00\)00241-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(00)00241-0).
- Tavolato, C., & Isaksen, L. (2015). On the use of a Huber norm for observation quality control in the ECMWF 4D-Var. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141, 1514—1527. <https://doi.org/10.1002/qj.2440>.
- Voigt, A., Albern, N., Ceppi, P., Grise, K., Li, Y., & Medeiros, B. (2020). Clouds, radiation, and atmospheric circulation in the present — day climate and under climate change. *WIREs Climate Change*, 12(2), 22. <https://doi.org/10.1002/wcc.694>.
- Wild, M. (2016). Decadal changes in radiative fluxes at land and ocean surfaces and their relevance for global warming. *WIREs Climate Change*, 7(1), 91—107. <https://doi.org/10.1002/wcc.372>.
- Wild, M. (2009). Global dimming and brightening: A review. *Journal of Geophysical Research*, 114(D00D16), 31. <http://doi:10.1029/2008JD011470>.
- Yang, S., Wang, X.L., & Wild, M. (2019). Causes of Dimming and Brightening in China Inferred from Homogenized Daily Clear-Sky and All-Sky in Situ Surface Solar Radiation Records (1958—2016). *Journal of Climate*, 32(18), 5901—5913. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0666.1>.
- Yuan, M., Leirvik, T., & Wild, M. (2021). Global Trends in Downward Surface Solar Radiation from Spatial Interpolated Ground Observations during 1961—2019. *Journal of Climate*, 34(23), 9501—9521. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0165.s1>.
- Zatula, V.I., Kyhtenko, Ya.V., Oliinyk, R.V., & Snizhko, S.I. (2021). Evaluation of atmosphere clearness and cloudiness parameters in the southern regions of Ukraine using statistical analysis. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series «Geology. Geography. Ecology»*, (55), 159—173. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2021-55-12>.