УДК 551.577.38+551.581.1

Семенова Інна Георгіївна,
д. геогр. н., професор кафедри військової підготовки,
Одеський державний екологічний університет, вул. Львівська, 15, м. Одеса, 65016, Україна,
e-mail: in_home@ukr.net, https://orcid.org/0000-0003-3383-4848;
Польовий Анатолій Миколайович,
д. геогр. н., професор, завідувач кафедри агрометеорології та агроекології,
Одеський державний екологічний університет,
e-mail: apolevoy@te.net.ua, https://orcid.org/0000-0001-8395-0068

ПРОГНОСТИЧНИЙ РОЗПОДІЛ ПОСУХ ТЕПЛОГО СЕЗОНУ ПО ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ В 2021-2050 РР.

В даній статті представлені результати аналізу просторово-часового розподілу посух в теплі сезони періоду 2021-2050 рр. по території України, отримані з використанням даних кліматичного моделювання в рамках кліматичних сценаріїв RCP4.5 та RCP6.0. Оцінка подій посух та їх інтенсивності виконана на базі стандартизованого індексу посух SPEI на масштабі 7 місяців, який охоплює теплий період року з квітня по жовтень. Аналіз прогностичного часового ходу індексу посух по регіонах країни показав, що за обома сценаріями спостерігатиметься тенденція до переходу від помірно вологих умов у 2021-2035 рр. до посушливих умов у 2037-2050 рр. При цьому в рамках сценарію RCP6.0 прогнозується більш тривалий перехід протягом 2030-х років з високою просторовою мінливістю індексу посух в цей період. Найбільш посушливими за обома сценаріями очікуються 2044-2048 рр., коли в ряді областей сезонна посуха може досягнути екстремальної інтенсивності. Встановлено, що в рамках обох сценаріїв очікується збільшення кількості сезонів з посухою протягом досліджуваного періоду, при цьому, на відміну від сценарію RCP4.5, за сценарієм RCP6.0 максимум повторюваності посух в другій половині періоду не зосереджений лише на півдні, а прогнозується також в східних і північних областях, що свідчить про суттєві просторові зміни прогнозованого характеру регіональної циркуляції атмосфери в рамках більш жорсткого сценарію. Кількість сезонів з посухою коливатиметься в різних областях від 2-3 випадків/10 років на початку досліджуваного періоду до 6-10 випадків/10 років наприкінці періоду. За обома сценаріями, максимум повторюваності сезонів з посухою в 2021-2030 рр. припадатиме на західні області України, при цьому в рамках сценарію RCP4.5 в південних областях в цей період посух майже не прогнозується. В період 2031-2040 рр. зростання кількості сезонів з посухою в середньому до 4-6 випадків/10 років відбуватиметься по всіх регіонах, окрім західних областей в рамках сценарію RCP6.0. В останнє десятиліття 2041-2050 рр. триватиме зростання посушливості, при цьому за сценарієм RCP6.0 кількість посушливих сезонів загалом по Україні очікується більшою, ніж в сценарії RCP4.5.

***Ключові слова**: посуха, стандартизований індекс опадів-евапотранспірації, кліматичний сценарій, теплий сезон, режим опадів, режим температури.*

***И. Г. Семёнова, А. Н. Полевой. ПРОГНОСТИЧЕСКОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАСУХ ТЁПЛОГО СЕЗОНА ПО ТЕРРИТОРИИ УКРАИНЫ В 2021-2050 ГГ.** В данной статье представлены результаты анализа пространственно-временного распределения засух в теплые сезоны периода 2021-2050 гг. по территории Украины, полученные с использованием данных климатического моделирования в рамках климатических сценариев RCP4.5 и RCP6.0. Оценка событий засух и их интенсивности выполнена на базе стандартизированного индекса засухи SPEI на масштабе 7 месяцев, который охватывает теплый период года с апреля по октябрь. Анализ прогностического временного хода индекса засух по регионам страны показал, что по обоим сценариям будет наблюдаться тенденция перехода от умеренно влажных условий в 2021-2035 гг. до засушливых условий в 2037-2050 гг. При этом в рамках сценария RCP6.0 прогнозируется более длительный переход в течение 2030-х годов с высокой пространственной изменчивостью индекса засух в этот период. Наиболее засушливыми по обоим сценариям ожидаются 2044-2048 гг., когда в ряде областей сезонная засуха может достичь экстремальной интенсивности. Установлено, что в рамках обоих сценариев ожидается увеличение количества сезонов с засухой в течение исследуемого периода, при этом, в отличие от сценария RCP4.5, по сценарию RCP6.0 максимум повторяемости засух во второй половине периода не сосредоточен только на юге, а прогнозируется также в восточных и северных областях, что свидетельствует о существенных пространственных изменениях прогнозируемого характера региональной циркуляции атмосферы в рамках более жёсткого сценария. Количество сезонов с засухой будет колебаться в различных областях от 2-3 случаев / 10 лет в начале исследуемого периода до 6-10 случаев / 10 лет в конце периода. По обоим сценариям, максимум повторяемости сезонов с засухой в 2021-2030 гг. придётся на западные области Украины, при этом в рамках сценария RCP4.5 в южных областях в этот период засух почти не прогнозируется. В период 2031-2040 гг. рост количества сезонов с засухой в среднем до 4-6 случаев / 10 лет будет происходить по всем регионам, кроме западных областей в рамках сценария RCP6.0. В последнее десятилетие 2041-2050 гг. продолжится рост засушливости, при этом в сценарии RCP6.0 количество засушливых сезонов в целом по Украине ожидается больше, чем в сценарии RCP4.5.*

***Ключевые слова**: засуха, стандартизованный индекс осадков-эвапотранспирации, климатический сценарий, тёплый сезон, режим осадков, режим температуры.*

Вступ. Посуха є природним явищем, яке може виникати в будь-яких кліматичних умовах, тому це явище постає однією з найвідповідальніших природних небезпек, яка поширюється протягом повного гідрологічного циклу та зачіпає великі території, часто з тривалими економічними та екологічними наслідками. Не існує єдиного визначення посухи, але за комплексом причин та наслідків виділяють метеорологічні, сільськогосподарські, гідрологічні, ґрунтові та соціально-економічні посухи [1]. Тривалий дефіцит опадів у визначеному регіоні спричиняє метеорологічну посуху, потім проявляється в зниженні вологості ґрунту, веде до дисбалансу у ви-

© Семенова І. Г., Польовий А. М., 2020 *https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-53-13*

паровуванні та стоку, через що поступово порушується весь стан екологічної системи, впливаючи на економічні складові.

Постановка проблеми. Спостереження за частотою та інтенсивністю посушливих явищ в умовах глобальних кліматичних змін показують стійку тенденцію до посилення цих процесів в багатьох районах Європи. Дослідження тенденцій розповсюдження та інтенсивності посух за останні півстоліття виявили, що в Європі виділяються дві великі області з різними тенденціями частоти появи та тривалості посух. Так, протягом 1950-2015 рр. в південних і західних регіонах, а також у Карпатському регіоні, на узбережжі Чорного моря, в Україні і частині Центральної Європи спостерігалися тенденції наростання повторюваності та інтенсивності посух, тоді як в більшості районів Північної і Східної Європи відзначалося зниження цих параметрів [2]. Особливо процеси збільшення інтенсивності посух посилилися у весняний та літній періоди, що цілком вірогідно через спостережуване зростання температури повітря в регіоні [3]. Оскільки Україна є одним з провідних виробників зернових культур в Європі, а сільськогосподарська галузь завжди була пріоритетною в економічному розвитку країни, теоретичні знання про можливі події посух як в найближчому часі, так і віддаленому майбутньому, здатні поліпшити якість планування та розробки комплексних заходів, спрямованих на розвиток агропромислового комплексу та забезпечення продовольчої безпеки країни.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В XXI столітті, за даними Caloiero та ін. [4], у більшості регіонів континентальної Європи та Середземноморського басейну було виявлено три основні події посухи: у 2003, 2011 та 2014 рр. Перші десятиліття поточного століття в Україні були відзначені зростанням посушливості теплого сезону року [5]. В усіх агрокліматичних зонах найбільш поширеними є весняно-літні посухи: в період 1995-2012 рр. їх кількість в кожному сезоні коливалася від 3-4 випадків в Поліссі до 7-8 випадків у Степу. Посухи вегетаційного періоду (квітень-жовтень) також мали тенденцію до збільшення частоти появи та посилення інтенсивності на початку поточного століття по всій Україні. Такі тенденції, як показано в [6], зумовлені зміною регіональної циркуляції атмосфери, яка проявилася у послаблені циклонічної діяльності на території країни в зимовий період. Суттєве зменшення кількості південних циклонів, які є одним з кліматоутворюючих факторів через значні запаси вологи, які вони приносять на територію України, призвело до більш частої та ранньої появи посух у весняний період і посилення їх суворості влітку через нестачу запасів вологи у ґрунті.

Просторово-часовий розподіл посух цілком залежить від температурно-вологісного режиму певної території. На теперішній час більшість оцінок майбутніх погодних умов ґрунтується на використанні проекцій змін у всіх компонентах кліматичної системи, які отримані за результатами модельних імітацій з використанням набору сценаріїв RCP (репрезентативні траєкторії концентрацій), заснованих на концентраціях вуглецю в атмосфері [7]. RCP визначаються приблизною сумарною величиною радіаційної дії (РД) у 2100 р. в порівнянні з 1750 р., яка дорівнює відповідно: 2,6 $Вт \cdot м^{-2}$ для RCP2.6; 4,5 $Вт \cdot м^{-2}$ для RCP4.5; 6,0 $Вт \cdot м^{-2}$ для RCP6.0; 8,5 $Вт \cdot м^{-2}$ для RCP8.5. Сценарій RCP2.6 передбачає скорочення викидів з доволі низьким рівнем дії, сценарії RCP4.5 і RCP6.0 передбачають стабілізацію викидів, а найбільш жорсткий сценарій RCP8.5 відповідає вельми високим рівням викидів парникових газів.

Дослідження проекцій змін температури повітря та опадів по території України в рамках сценаріїв RCP показали [5], що у короткостроковій перспективі очікується загальне підвищення приземної температури повітря, яке торкнеться всіх областей України та особливо інтенсивним буде в північно-східному регіоні. Так, за сценарієм RCP8.5 до 2030 р. аномалії температури відносно базового періоду 1981-2010 рр. коливатимуться в межах +0,8...+1,2ºС, і лише на сході в окремі роки досягатимуть +1,8ºС. Після 2033 р. на півдні та у 2036-2037 рр. в більш північних районах температура почне швидко зростати, і в п'ятиліття з 2045 по 2050 рр. аномалії температури можуть досягати +2,8...+3,1ºС, особливо в східній частині і на півночі. В південних районах аномалії температури розподіляться досить однорідно у виділених довготних межах.

Водночас на території України спостерігатимуться різноманітні тенденції у зміні інтенсивності і кількості опадів за різними сценаріями. Так, за кліматичним сценарієм RCP8.5, очікується переважно зростання кількості опадів в середині періоду і їх зменшення у більшості областей до 2050 р. При цьому прогнозується поступове зростання інтенсивності опадів при скороченні їх тривалості [8], що сприятиме подовженню безперервних бездощових періодів і настання й посилення посух в майбутньому.

Порівняльний аналіз просторового розподілу і повторюваності прогнозованих сезонних посух, які визначалися за індексом посух SPI (the Standardized Precipitation index [9, 10]) на масштабі 7 місяців з квітня по жовтень впродовж 2020-2050 рр., показав [11], що загальна кіль-

кість посух очікується вище за сценарієм RCP2.6, ніж за сценарієм RCP8.5. А саме, за сценарієм RCP2.6 по території України сезонні посухи прогнозуються в середньому у 48-56% всіх років, при цьому найбільша прогнозована повторюваність посух припадає на північно-східні області та Карпатський регіон. За сценарієм RCP8.5 загальна повторюваність посух прогнозується переважно у межах 44-52%, з найбільшою частотою в Приазов'ї, Закарпатті та на крайній півночі (Київська та Чернігівська області). При цьому за обома сценаріями майже кожний третій теплий сезон прогнозується з м'якою посухою крізь на території країни. Загалом, в більш жорсткому сценарії RCP8.5, прогнозується більше помірних та сильних сезонних посух, а в рамках сценарію RCP2.6 переважатимуть м'які посухи. В рамках сценарію RCP8.5 майже в усіх регіонах, окрім північного сходу, очікується збільшення інтенсивності та тривалості посушливих періодів після 2035 р., найбільш тривала та інтенсивна посуха прогнозується у 2042-2045 рр., а на півдні триватиме й до 2050 р. На більш тривалих часових масштабах (12-24 місяці), які відповідають умовам гідрологічних посух, наприклад, в Карпатському регіоні за сценаріями RCP2.6, RCP4.5 і RCP8.5 також очікується зміна режиму зволоження від відносно вологого у 2020-2032 рр. до настання і посилення посушливих умов після 2037-2038 рр. [12]. Схожі тенденції до збільшення кількості та інтенсивності посух в найближчому майбутньому періоді на півдні Східної Європи отримані й в інших дослідженнях [2, 13]. *Оскільки в більшості існуючих досліджень з використанням кліматичних сценаріїв RCP приділяється увага умовно "середньому" сценарію* RCP4.5 та "жорсткому" (найбільш критичному) сценарію RCP8.5, невирішеним питанням в можливому розподілі посух по території України залишається кліматичний сценарій RCP6.0, який є проміжним за ступенем радіаційної дії між двома зазначеними сценаріями, але, оскількі існує можливість і його реалізації в майбутньому, знання про розподіл посух по території України в рамках цього сценарію є необхідними для встановлення повної загальної теоретичної картини подій посух в усіх потенційно можливих кліматичних умовах.

Метою даної роботи є встановлення просторово-часового розподілу посух по території України в теплий період року (квітень-жовтень) в короткостроковій перспективі протягом 2021-2050 рр. в рамках кліматичних сценаріїв RCP4.5 та RCP6.0, які описують помірно жорсткі майбутні кліматичні умови, що характеризуються різними темпами зростанням глобальної приземної температури без її стабілізації у період, що розглядається.

Робота виконана в рамках прикладного дослідження „Оцінка ефективності використання поновлювальних та невичерпних природних ресурсів України в умовах зміни клімату" (2017-2019 рр., номер державної реєстрації 0117U002423, фінансування за загальним фондом державного бюджету).

Методика дослідження та вихідні дані. Оцінка посух виконана з використанням стандартизованого метеорологічного індексу посух SPEI (the Standardized Precipitation Evapotranspiration index). Індекс SPEI уведений у роботах Вісенте-Серрано та ін. [14, 15], і, як і індекс SPI, базується на часових рядах опадів, але з врахуванням випаровуваності через евапотранспірацію, розрахунок якої передбачає використання також рядів температури повітря.

Індекс SPEI розраховується за процедурою, аналогічною розрахунку SPI [16], але замість опадів використовуються різниці (D) місячних сум опадів (R) і потенційної евапотранспірації (PET)

$$D_i = R_i - PET_i, \qquad (1)$$

де i – порядковий номер розрахункового місяця.

Цей вираз відображує в спрощеному вигляді схему водного балансу вертикального стовпа ґрунту від його поверхні до глибини, де припиняється вологообмін [17]. Хоча в (1) не враховується вологообмін поверхні ґрунту з нижче розташованими шарами, така інтерпретація виявилася задовільною для врахування впливу температурного режиму на сумарну зволоженість.

Для визначення PET використовується метод Торнтвейта [18], що робить індекс SPEI майже таким же чутливим до вмісту вологи у ґрунті, як і відомий індекс посух Палмера [19, 20].

Значення індексу SPEI, як і SPI, стандартизуються для можливості порівняння з іншими величинами в різних географічних пунктах і на різних проміжках часу та мають ті ж самі критерії для визначення посушливих або вологих умов. Обчислені додатні значення SPEI вказують на більшу, ніж в середньому, кількість опадів, від'ємні значення – навпаки.

Набір вихідних даних по опадах та температурі повинен базуватися на безперервному періоді часу тривалістю не менше 30 років. Періоди для усереднювання обираються для деяких масштабів часу, які, в залежності від розв'язуваної задачі, звичайно коливаються від 1 до 48 місяців. Епізод посухи для певного масштабу часу визначається як період, в якому SPEI є безперервно негативним. Інтенсивність посухи визначається

за наступними критеріями: –0,99...0,00 – м'яка посуха; –1,49...–1,00 – помірна посуха; –1,99...–1,50 – сильна посуха; ≤ –2,00 – екстремальна посуха.

Як показують порівняльні дослідження [3], уведення в розрахунок температури повітря і врахування таким чином випаровуваності є вельми корисним в умовах високих значень температури, адже це дозволяє більш точно оцінити ступень висушування в приземному шарі повітря і поверхні ґрунту, що в умовах прогнозованого зростання глобального температури робить індекс SPEI більш надійним для оцінки майбутніх епізодів посух.

В даному досліджені в якості вихідних даних взяті середньомісячні поля приземної температури та інтенсивності опадів результатів кліматичного моделювання за 39 глобальними моделями ППСМ5 (CMIP5) [7] як мультимодельні середні.

Доступ до даних та їх попередня обробка здійснена за допомогою сервісу Climate Explorer [21]. Оскільки крок регулярної сітки вихідних даних доволі великий у 2,5 градуси, проводилося осереднення для географічного центру кожної з 25 областей України. Тобто, отримані ряди температури та опадів є середніми по квадрату сітки з кроком 2,5 градуси, що в більшості випадків охоплює значну площу будь-якої адміністративної області і відповідає осередненим умовам в ній.

Розрахунок індексу посух SPEI на базі сформованих рядів опадів та температури здійснено за допомогою програмного коду SPEI Calculator, який надається авторами індексу у відкритому доступі [22]. Для аналізу обраний індекс SPEI на масштабі 7 місяців, який охоплює теплий період року з квітня по жовтень. Тобто, оцінка розподілу на цьому масштабі дає уявлення про повторюваність та інтенсивність сезонних, або сільськогосподарських посух, які можуть очікуватися на майбутній період часу за відповідними даними кліматичного моделювання.

Для узагальнення інформації по окремих областях в графічному вигляді їх було об'єднано по п'яти регіонам: Захід (області – Закарпатська, Рівненська, Волинська, Львівська, Івано-Франківська, Хмельницька, Тернопільська, Чернівецька), Схід (області – Харківська, Донецька, Луганська), Центр (області – Вінницька, Черкаська, Полтавська, Дніпропетровська, Кіровоградська), Північ (області – Житомирська, Київська, Чернігівська, Сумська), Південь (області – Одеська, Миколаївська, Херсонська, Запорізька, АР Крим).

Результати досліджень.

Просторово-часовий розподіл посух в рамках сценарію RCP4.5. Розглянемо отриманий в результаті розрахунків часовий розподіл значень індексу посух SPEI в рамках кліматичного сценарію RCP4.5 по різних регіонах України.

На рис. 1 представлені графіки часового ходу прогностичного індексу посух SPEI на масштабі 7 місяців (квітень-жовтень) на майбутній період з 2021 р. по 2050 р. Як можна бачити, по всіх регіонах України очікується поступове зниження значень індексу SPEI від переважно додатних (SPEI > 0) у першу половину досліджуваного періоду до переважно від'ємних (SPEI < 0) у другу половину.

В західному регіоні в період 2021-2032 рр. переважатимуть помірно вологі умови до нейтральних у 2024-2027 рр. У перехідний період 2032-2036 рр. спостерігатиметься коливання умов від помірно посушливих до помірно зволожених. Після 2037 р. прогнозується переважання від'ємного індексу SPEI, який в окремі роки може досягати значень сильної посухи. Найбільш посушливим прогнозується десятирічний період з 2037 р. по 2046 р., коли майже кожного року по всіх західних станціях сезонний індекс SPEI прийматиме від'ємні значення.

В північному регіоні України спостерігатиметься аналогічний часовий хід значень індексу SPEI. Помірно вологі умови спостерігатимуться в період з 2021 р. по 2036 р., окрім декількох посушливих сезонів (2027, 2033-2034 рр.). Починаючи з 2037 р. прогнозується наростання посушливих умов в теплих сезонах, але наприкінці періоду очікуються роки з помірно вологими умовами (2047, 2049 рр.). Найбільш посушливим прогнозується 2042 р., коли по всіх областях значення індексу посушливості може досягнути екстремального значення.

На сході України, як і в інших областях, спостерігатиметься наростання посушливості теплих сезонів протягом досліджуваного періоду. Згідно часового ходу індексу SPEI, з 2021 по 2037 рр. переважатимуть високі додатні осереднені значення індексу SPEI. При цьому лише в двох-трьох роках по різних областях (2026-2027 рр., 2033-2034 рр.) очікуються слабкі сезонні посухи. Починаючи з 2037 р. і до кінця періоду майже всі сезони прогнозуються посушливими, за виключенням 2041 р. та 2047 р., коли індекс SPEI близький до нейтрального стану умов зволоження. Найбільш сильні посуха очікується у 2042 р., коли показники індексу SPEI можуть досягнути екстремальних значень.

В центральному регіоні України спостерігатимуться часові коливання індексу SPEI від зволожених до посушливих умов, при загальній тенденції до зменшення індексу від додатних до від'ємних значень протягом досліджуваного пе-

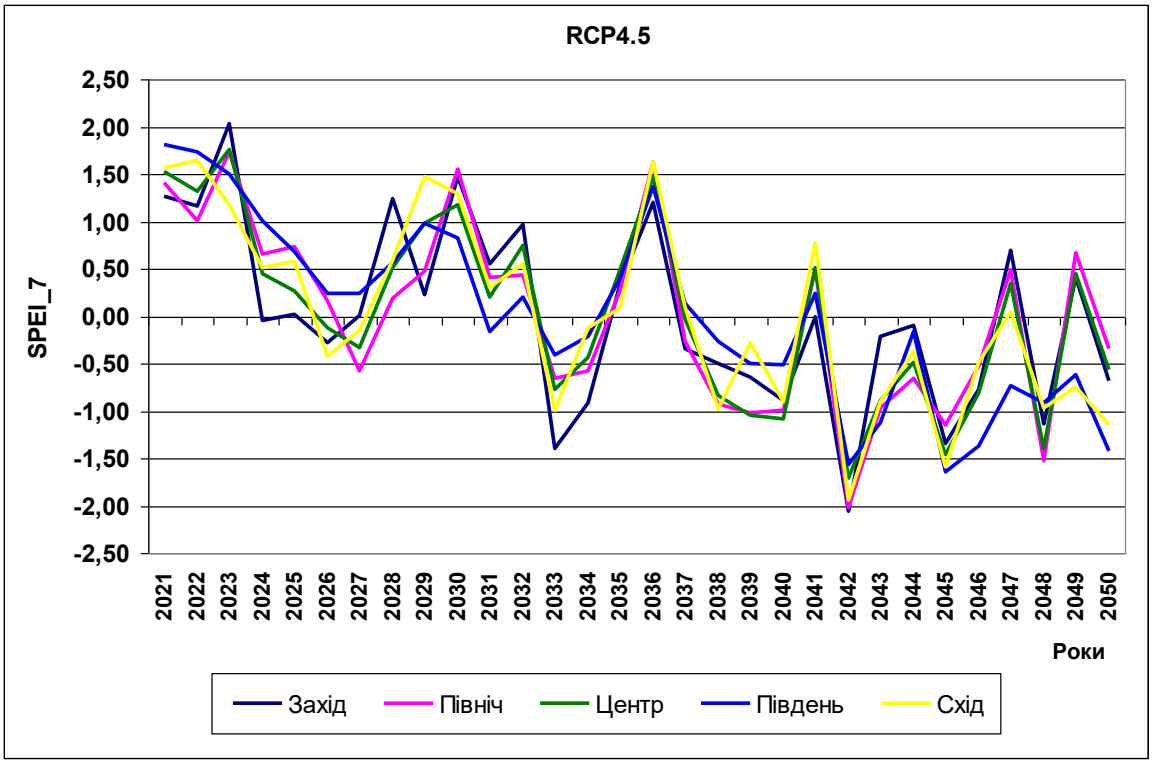

Рис. 1. Часовий хід осередненого прогностичного індексу SPEI_7 за сценарієм RCP4.5 по регіонах України за період 2021-2050 рр.

ріоду. З 2021 р. по 2037 р. по деяких областях Центру буде спостерігатися від 2 до 5 років з слабкими посухами переважно у 2024-2027 рр. та 2033-2034 рр. Починаючи з 2038 рр. спостерігатиметься переважання посушливих сезонів, при цьому майже в усіх центральних областях (окрім Дніпропетровської) посуха буде відсутньою в 2041 р., 2047 р. та 2049 р. Найбільш інтенсивна посуха прогнозується в 2042 р., у більшості областей у 2045 р. та 2048 р.

На півдні України спостерігатиметься аналогічний до інших регіонів країни тренд у часовому ході індексу SPEI, але, на відміну від інших областей, до 2038 р. зберігатимуться переважно вологі або нейтральні умови зволоження. Друга половина періоду характеризується стійким переважанням від'ємних значень індексу SPEI, що свідчить про майже безперервний посушливий період до 2050 р. з коливанням інтенсивності сезонних посух майже в усіх південних областях, при цьому значення індексу, на відміну від інших регіонів, досягатимуть позначок лише сильної посухи (2042, 2045 рр.).

Просторово-часовий розподіл посух в рамках сценарію RCP6.0. На рис. 2 представлені графіки часового ходу прогностичного індексу посух SPEI на масштабі 7 місяців (квітень-жовтень) по регіонах України, отриманих в рамках кліматичного сценарію RCP6.0 за період з 2021- 2050 рр.

Порівняно з часовим ходом індексу SPEI за сценарієм RCP4.5 (див. рис. 1), слід відзначити, що в рамках сценарію RCP6.0, незважаючи на загальну тенденцію до зменшення значень індексу від додатних в першій половині періоду до від'ємних в другій половині, спостерігатиметься досить помітний розкид у поведінці індексу по окремих регіонах. Крім того, доволі тривалий період – з 2030 р. до початку 2040-х, по всіх регіонах прогнозується чергування відносно вологих (SPEI > 0) та відносно посушливих (SPEI < 0) сезонів, тобто немає, як в сценарії RCP4.5, чіткого періоду переходу від вологого до посушливого періоду в середині 2030-х років.

В західному регіоні України в період 2021-2032 рр. переважатимуть сезони з помірним та добрим зволоженням (особливо 2025-2027 рр.), а починаючи з 2038 р. і по 2050 р. частіше спостерігатимуться сезони з посухою. Найбільш посушливими по всіх західних областях очікуються теплі сезони 2024 р., 2045-2047 рр., коли прогнозований індекс SPEI може досягти значень сильної посухи.

В північному регіоні України спостерігатиметься аналогічний часовий хід значень індексу посухи SPEI, але відносно вологі сезони переважатимуть до 2040 р., після чого спостерігатиметься поступове зниження індексу до від'ємних значень до кінця періоду, що розглядається. Найбільш тривалим безперервним періодом з тепли-

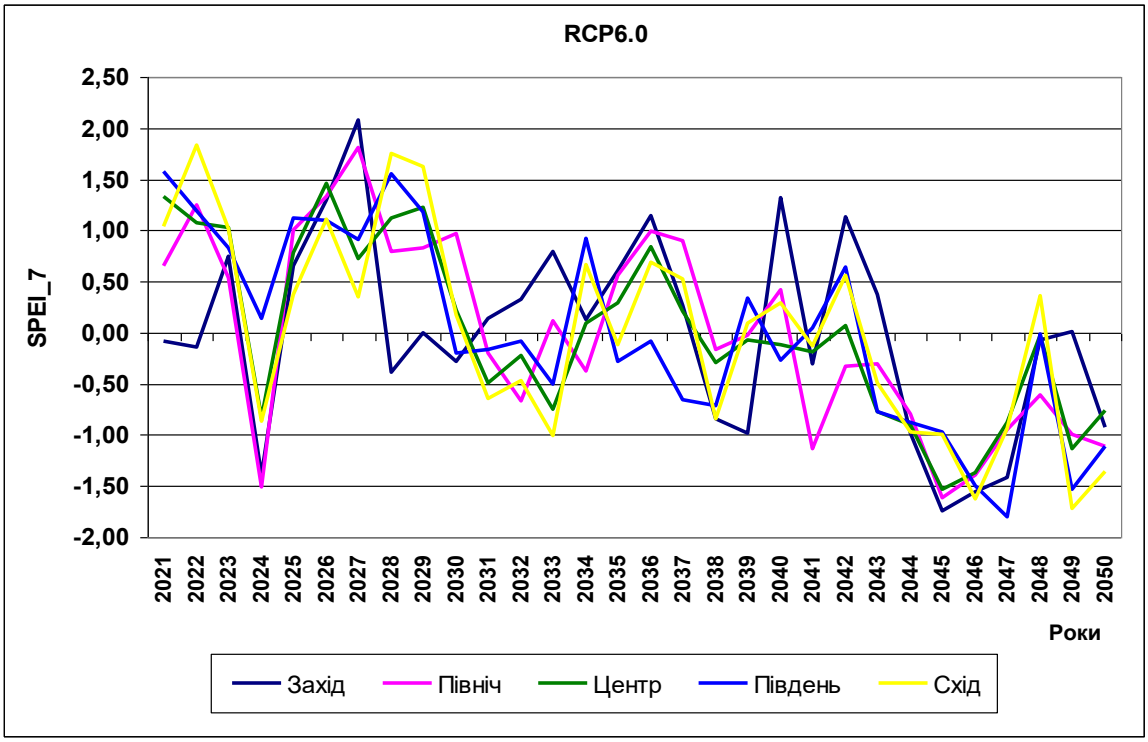

Рис. 2. Часовий хід осередненого прогностичного індексу SPEI_7 за сценарієм RCP6.0 по регіонах України за період 2021-2050 рр.

ми сезонами з високим зволоженням прогнозується 2025-2030 рр. Починаючи з 2041 р. по всіх північних областях, окрім Житомирської, всі теплі сезони прогнозуються посушливими. Найбільш інтенсивні посухи очікуються у 2024 р. та 2045 р., коли індекс SPEI може досягти значень сильної посухи майже по всіх областях.

В східному регіоні України спостерігатиметься подібний до розглянутих вище регіонів часовий розподіл посушливих та вологих періодів. Найбільш зволожені теплі сезони спостерігатимуться у 2022 р., 2028-2029 рр. Посуха 2024 р. очікується слабкою, на відміну від північних та західних областей. Починаючи з 2038 р. переважатимуть теплі сезони з посухою, при цьому найбільшої інтенсивності вони досягатимуть у 2046 р. та 2049 р., коли прогнозований індекс SPEI може досягнути показників сильної посухи.

В центральному регіоні України прогнозується подібний до розглянутих регіонів тренд індексу SPEI. Тобто, з 2021 р. по 2036-2037 рр. переважатимуть умови доброї зволоженості, при цьому виділяються посушливі сезони 2024 р. та 2031-2033 рр., коли за розрахованими значеннями SPEI очікується слабка посуха по всіх областях. Починаючи з 2038 р. спостерігатиметься більше посушливих сезонів, але не в усіх областях однаково. Відмінний від інших областей хід індексу SPEI спостерігатиметься у Вінницькій області, де інтенсивність посушливих сезонів прогнозується дещо вищою, ніж в інших центральних областях. Загалом, найбільш посушливим очікується період 2043-2047 рр., коли посухи за значенням індексу SPEI можуть досягати помірної та сильної інтенсивності.

На півдні України, на відміну від інших регіонів, в першу половину досліджуваного періоду сезонних посух не прогнозується. До 2036 р. переважатимуть помірно вологі сезони або зі зволоженням близько норми. Починаючи з теплих сезонів 2035-2037 рр. очікується загальне збільшення посушливості, при цьому з 2043 р. по 2050 р. майже всі сезони по півдню України прогнозуються з безперервною посухою різної інтенсивності, яка в 2047 р. в Одеській області і Криму може досягнути екстремальної інтенсивності.

Прогнозована повторюваність теплих сезонів з посухою по областях України. Далі розглянемо, як розподілятиметься кількість теплих сезонів з посухою (SPEI_7 < 0) по окремих десятиліттях досліджуваного періоду за обома сценаріями. Як можна бачити з графіків на рис. 3, в рамках кліматичного сценарію RCP4.5 загальна кількість сезонів з посухою за тридцятирічний період по областях України коливатиметься в межах від 13 до 16 років (рис. 3, а), а в рамках сценарію RCP6.0 – в межах від 14 до 17 років (рис. 3, б). Тобто, майже кожний другий теплий сезон може бути посушливим, коли інтенсивність посухи буде коливатися від слабкої до сильної або навіть екстремальної, як показано вище.

За обома сценаріями в усіх областях найменша кількість посушливих сезонів очікується в період з 2021 по 2030 рр. При цьому найбільша кількість посушливих сезонів в цей період прогнозується в західних областях, де кількість посушливих сезонів становитиме 2-3 випадки/10 років в рамках сценарію RCP4.5 та до 4-5 випадків/10 років в рамках сценарію RCP6.0. Найменша кількість посух очікується в південних областях за сценарієм RCP4.5, де лише в Миколаївській області прогнозується один сезон з посухою, а в інших вони будуть відсутні. За сценарієм RCP6.0 найменша кількість посушливих сезонів в цей період припадатиме на східні області (1 випадок на 10 років).

В період з 2031 р. по 2040 р. кількість посушливих сезонів суттєво зростатиме по всіх регіонах і по всіх областях, але з деякими відмінностями між кліматичними сценаріями. За сценарієм RCP4.5 у більшості областей кількість сезонів

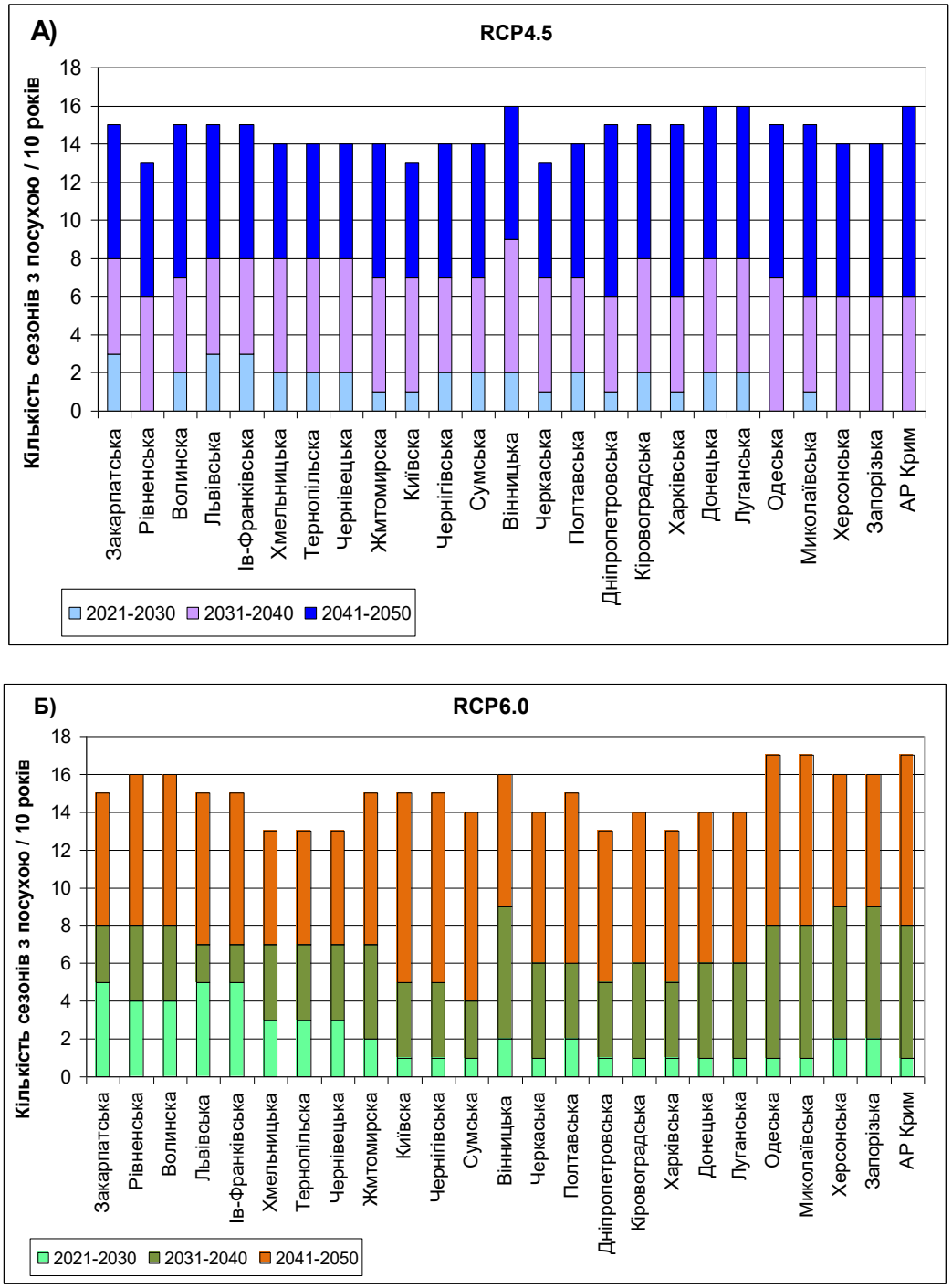

Рис. 3. Прогнозована кількість сезонів з посухою (SPEI_7 < 0) за кліматичними сценаріями RCP4.5 (а) та RCP6.0 (б) в областях України по десятиліттях періоду 2021-2050 рр.

з посухою становитиме 5-6 випадків /10 років, а у Вінницькій області – 7 сезонів з посухою. За сценарієм RCP6.0 в західних областях кількість сезонів з посухою майже не зміниться і коливатиметься від 2 до 4 сезонів/10 років, а в деяких областях (Закарпатська, Івано-Франківська, Львівська) навіть зменшиться порівняно з попередньою декадою. Найбільше зростання кількості посушливих сезонів прогнозується в південних областях, а також у Вінницькій області, де вони становитимуть 6-7 випадків/10 років.

В останньому періоді з 2041 р. по 2050 р. по всій території України триватиме наростання повторюваності посушливих сезонів в рамках обох сценаріїв.

В рамках сценарію RCP4.5 найбільш часто посушливі теплі сезони спостерігатимуться в південних областях, так в АР Крим всі 10 років очікуються з сезонною посухою, в інших південних областях, а також в Харківській області – по 9 років за десятилітній період. В рамках сценарію RCP6.0 найбільше зростання кількості сезонів з посухою прогнозується на півночі країни, в деяких східних (Донецька, Луганська) та південних (Одеська, Миколаївська, АР Крим) областях, а також в половині західних областей, де кількість сезонів з посухою може досягнути 8-10 випадків/10 років.

Висновки. В даному досліджені проаналізовано часові ряди індексу посух SPEI, які були розраховані для всіх областей України для теплих сезонів періоду 2021-2050 рр. з використанням даних кліматичного моделювання ППСМ5 для сценаріїв RCP4.5 та RCP6.0. В рамках обох сценаріїв отримано, що в усіх областях України спостерігатиметься тенденція переходу від помірно вологих умов у 2021-2036 рр. до посушливих умов у 2037-2050 рр. Особливо посушливою очікується середина 2040-х років, коли в більшості областей України спостерігатимуться майже щорічно сезонні помірні та сильні посухи. Що стосується посух екстремальної інтенсивності, то вони прогнозуються переважно в більш м'якому сценарії RCP4.5.

Слід зазначити також інші відмінності, які проявляються в часовому ході індексу SPEI в рамках різних кліматичних сценаріїв. В сценарії RCP6.0, на відміну від RCP4.5, перехідний період від вологих умов до посушливих виявляється досі тривалим – з 2030 р. до початку 2040-х. Протягом цього часу прогнозуються міжрічні коливання індексу невеликої амплітуди в межах [-1; +1] по всіх регіонах, і лише в останнє десятиліття періоду, що розглядається, очікується переважання посушливих сезонів. Крім того, екстремуми індексу SPEI по різних регіонах в сценарії RCP6.0 більш розкидані у часі, ніж в сценарії RCP4.5, за яким часовий хід індексу є досить одноманітним в усіх регіонах країни. Такий характер змін індексу посушливості непрямо свідчить про те, що за умов реалізації кліматичного сценарію RCP6.0 можна очікувати підвищену просторово-часову мінливість атмосферних процесів, які забезпечують температурно-вологісний режим території. Цей висновок також може знайти підтвердження в тому, що на фоні очікуваного збільшення кількості сезонів з посухою в рамках обох сценаріїв в другій половині досліджуваного періоду, за сценарієм RCP6.0, на відміну від сценарію RCP4.5, просторовий максимум повторюваності посух не зосереджений в одному регіоні, а прогнозується як в південних, так східних і північних областях, що свідчить про суттєві просторові зміни характеру регіональної циркуляції атмосфери, які прогнозуються в рамках більш жорсткого сценарію.

Якщо порівнювати отриманий в даному дослідженні просторово-часовий розподіл посух за сценаріями RCP4.5 та RCP6.0 з результатами щодо інших сценаріїв (RCP2.6, RCP8.5) [11], можна відмітити загальну схожість трендів індексу посухи, які вказують на поступовий перехід від помірно вологих умов у 2020-х роках (з однією значною посухою в середині періоду) до переважно посушливих умов у 2040-х роках, при цьому частота виникнення сезонних посух майже однакова в усіх сценаріях, хоча епізоди тривалих посух доводяться на різні часові проміжки в різних сценаріях. Щодо географічного розподілу максимумів повторюваності посух по території країни, слід зазначити, що в усіх сценаріях прогнозується наростання посушливості в західних та північних регіонах країни, де кількість посушливих сезонів наприкінці досліджуваного періоду зрівнюється з південними регіонами, при цьому епізоди екстремальної посухи прогнозуються майже в усіх регіонах.

Отримані результати можуть виступати в якості науково-консультативного матеріалу при довгостроковому плануванні і оцінці ризиків господарсько-економічної діяльності різних галузей, перш за все в сільському господарстві.

Література

1. *Клімат України [Текст] / за ред. В.М. Ліпінського, В.А. Дячука, В.М. Бабіченко. – К.: Вид. Раєвського, 2003. – 343 с.*
2. *Spinoni J. Meteorological Droughts in Europe: Events and Impacts – Past Trends and Future Projections [Text] / J. Spinoni, G. Naumann, J. Vogt, P. Barbosa. – Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2016. EUR 27748 EN. https://doi.org/10.2788/450449*

3. *Spinoni J. Pan–European seasonal trends and recent changes of drought frequency and severity [Text] / J. Spinoni, G. Naumann, J. Vogt // Global and Planetary Change. – 2017. – Vol. 148. – P. 113–130. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.11.013*
4. *Caloiero T. Drought Analysis in Europe and in the Mediterranean Basin Using the Standardized Precipitation Index [Text] / T. Caloiero, S. Veltri, P. Caloiero, F. Frustaci // Water, 2018. – Vol. 10. – P. 1043. https://doi.org/10.3390/w10081043*
5. *Семенова І.Г. Синоптичні та кліматичні умови формування посух в Україні. Монографія [Текст] / І. Г. Семенова. – Харків: ФОП Панов А. М., 2017. – 236 с.*
6. *Semenova I. Cyclonic activity in cold season over territories of Belarus and Ukraine and its relation to the warm season droughts [Text] / I. Semenova, K. Sumak // Croatian Meteorological Journal. – 2017. – Vol. 52. – N 52. – P. 59–73.*
7. *IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of WG I to the 5th Assessment Report of the IPCC [Text] / Stocker, T.F., et al. (eds.). – Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2013. – 1535 p.*
8. *Семенова І.Г. Тенденції майбутніх змін у режимі опадів в Україні в літній період 2020–2050 рр. [Текст] / І.Г. Семенова, О.А. Інтроліґатор // Географія та туризм. – 2018. – Вип. 42. – С. 132–142.*
9. *McKee T.B. The relationship of drought frequency and duration to time scales [Text] / T.B. McKee, N.J. Doesken, J. Kliest // Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim, USA. – 1993. – P. 179–184.*
10. *Svoboda M. Standardized Precipitation Index User Guide [Text] / M. Svoboda, M. Hayes, D. Wood. – WMO–No. 1090: Geneva, 2012. – 17 p.*
11. *Семенова І.Г. Просторово–часовий розподіл посух в Україні в умовах майбутньої зміни клімату [Текст] / І.Г. Семенова // Фізична географія та геоморфологія. – 2015. – Вип.1 (77). – С. 144–151.*
12. *Семенова І.Г. Оцінка просторово–часового розподілу посух в Закарпатському регіоні в короткостроковій перспективі до 2050 року [Текст] / І.Г. Семенова // Укр. гідрометеорол. ж. – 2016. – № 18. – С. 62–68.*
13. *Guerreiro S.B. Future heat–waves, droughts and floods in 571 European cities [Text] / S.B. Guerreiro, R.J. Dawson, C. Kilsby, E. Lewis, A. Ford // Environ. Res. Lett. – 2018. – Vol.13, No 3. 034009. https://doi.org/10.1088/1748–9326/aaaad3*
14. *Vicente–Serrano S.M. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [Text] / S.M. Vicente–Serrano, S. Beguería, J.I. López–Moreno // J. of Climate. – 2010. – Vol. 23, No. 7. – P. 1696–1718.*
15. *Beguería S. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring [Text] / S. Beguería, S.M. Vicente-Serrano, F. Reig, B. Latorre // Int. J. Climatol. – 2014. – Vol. 34. – P. 3001–3023. https://doi.org/10.1002/joc.3887*
16. *Svoboda M. Handbook of Drought Indicators and Indices [Text] / M. Svoboda, B.A. Fuchs // Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. – Geneva, 2016. – 46 p.*
17. *Abramopoulos F. Improved ground hydrology calculations for global climate models (GCMs): Soil water movement and evapotranspiration [Text] / F. Abramopoulos, C. Rosenzweig, B. Choudhury // J. of Climate. – 1988. – Vol. 1. – P. 921–941.*
18. *Thornthwaite C.W. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance [Text] / C.W. Thornthwaite, J.R. Mather // Publications in Climatology. Laboratory of Climatology, Drexel Institute of Technology, Centerton, New Jersey, USA. – 1957. – No. 10 (3). – P. 183–311.*
19. *Palmer W.C. Meteorological droughts [Text] / W.C. Palmer. – U.S. Department of Commerce Weather Bureau, 1965. – Research Paper 45. – 58 p.*
20. *Vicente–Serrano S.M. A new global 0.5° gridded dataset (1901–2006) of a multiscalar drought index: comparison with current drought index datasets based on the Palmer Drought Severity Index [Text] / S.M. Vicente–Serrano, S. Beguería, J.I. López–Moreno // J. of Hydrometeorology. – 2010. – Vol. 11. – P. 1033–1043.*
21. *Climate Explorer [Електронний ресурс] / Режим доступу: http://climexp.knmi.nl/ (Дата звернення: 20.06.2019).*
22. *SPEI Calculator [Електронний ресурс] / Режим доступу: http://digital.csic.es/handle/10261/10002/ (Дата звернення: 12.08.2019).*

Внесок авторів: *Семенова І. Г. – розрахунки, аналіз результатів, текст статті; Польовий А. М. – консультування при аналізі результатів.*

UDC 551.577.38+551.581.1

Inna Semenova,
Doctor of Science (Geography), Professor of Department of Military Training,
Odessa State Environmental University, 15 Lvivska St., Odesa, 65016, Ukraine,
e-mail: in_home@ukr.net, https://orcid.org/0000-0003-3383-4848;
Anatoly Polevoy,
Doctor of Science (Geography), Professor,
Head of Department of agrometeorology and agroecology, Odessa State Environmental University,
e-mail: apolevoy@te.net.ua, https://orcid.org/0000-0001-8395-0068

PROJECTED DISTRIBUTION OF THE WARM SEASON DROUGHTS OVER THE TERRITORY OF UKRAINE IN 2021-2050

Introduction. Drought is a natural phenomenon that occurs in all climates, and is one of the most relevant natural hazards, which propagates through the full hydrological cycle and affects large areas, often with long-term economic and environmental impacts. A prolonged deficit in precipitation over a defined region cause a meteorological drought, while the other types of drought describe secondary effects on specific ecological and economic compartments.

Recent trends in the drought distribution and intensity shows that Europe splits into two big areas, in which the southern and western regions have positive trends of drought frequency, duration, and severity, and the northern and eastern regions show a decrease in this parameters. Regarding the long events, territory of Ukraine belongs to the areas in which a prominent decrease in drought frequency, duration and severity are fixed. But positive trends in the drought characteristics are observed on the Black Sea coast, also in the Carpathian region, many droughts occurred in the past three decades. The **purpose of this study** to examine the results of analysis of the spatiotemporal distribution of warm season droughts (April-October) across the administrative areas of Ukraine in 2021-2050 under the climate scenarios RCP4.5 and RCP6.0 with them comparing.

Data and methods. Drought estimation was performed using the SPEI index (the Standardized Precipitation Evapotranspiration index). The inclusion of temperature through the potential evapotranspiration (PET) along with precipitation data allows SPEI to account for the impact of temperature regime on a drought situation.

A drought episode for given time scale is defined as a period, in which SPEI is continuously negative and reaches a value of –1.0 or less. In this study, the gridded fields of monthly air temperature and precipitation intensity from multimodel sets of global CMP5 models are taken for calculations of SPEI. Data access was made through the Climate Explorer. All data were averaged over the area of each of 25 administrative regions of Ukraine.

Research results. Analysis of the time series of the calculated SPEI index for both scenarios showed that in all regions of Ukraine there will be a tendency to transition from moderately wet conditions in 2021-2035 to droughty conditions in 2037-2050. In the first half of the study period drought is expected near 2024, as well as in 2030-2033 almost in all provinces except southern areas. In the second half of the period prolonged seasonal drought is projected in 2044-2047 over all Ukraine and in some areas drought may reach an extreme intensity.

Decade analysis of the SPEI7 time series showed that in both scenarios in all regions of Ukraine, the least number of dry seasons is expected from 2021 to 2030. The highest number of dry seasons in this period may reach up to 4-5 cases per 10 years in the western regions under RCP6.0 scenario. In other regions the number of dry warm seasons will be 2-3 cases per 10 years. In the period from 2031 to 2040, the number of dry seasons will increase substantially in all regions of Ukraine under RCP4.5 scenario, in which their number will be 5-6 cases per 10 years. Under RCP6.0 scenario, an increase in the number of droughts will be observed in all areas except the western regions, where will be from 2 to 4 dry seasons per 10 years. In the last decade from 2041 to 2050, in both scenarios, the number of dry seasons will increase throughout Ukraine compared to the previous decade. Under RCP6.0 scenario, the greatest increase is projected in the north of the country and in some other regions throughout Ukraine, where the maximum number of seasons with droughts will reached up 8-10 cases per 10 years.

Conclusions. Comparison of the SPEI7 time series for both scenarios showed that under RCP6.0 scenario the transition from wet conditions to dry conditions is projected during long period from 2030 to the early 2040s. In this time, small interannual variations of the SPEI index across all regions are expected, and only in the last decade the dry seasons will prevail. In addition, in the RCP6.0 scenario, maxima of drought

frequency are expected in few different regions of the country, compared with the RCP4.5 scenario, which indicates significant scenarios' differences in the predicted state of the regional atmospheric circulation determined the temperature and precipitation regimes in the future.

Keywords: drought, standardized precipitation evapotranspiration index, climate scenario, warm season, precipitation regime, temperature regime.

References

1. *Klimat Ukrainy [Climate of Ukraine]. (2003). Za red. V.M. Lipins'kogo, V.A. Dyachuka, V. M. Babíchenko. Kyiv: Vid. Raevs'kogo, 343.*
2. *Spinoni, J., Naumann, G., Vogt, J., Barbosa, P. (2016). Meteorological Droughts in Europe: Events and Impacts – Past Trends and Future Projections. Publications Office of the European Union, Luxembourg, EUR 27748 EN https://dx.doi.org/10.2788/450449*
3. *Spinoni, J., Naumann, G., Vogt, J. (2017). Pan-European seasonal trends and recent changes of drought frequency and severity. Global and Planetary Change, 148, 113–130 https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.11.013*
4. *Caloiero, T., Veltri, S., Caloiero, P., Frustaci, F. (2018). Drought Analysis in Europe and in the Mediterranean Basin Using the Standardized Precipitation Index. Water, 10, 1043 https://doi.org/10.3390/w10081043*
5. *Semenova I.H. (2017). Sinoptichni ta klimatichni umovi formuvannya posukh v Ukraini. [Synoptic and climatic conditions for the formation of droughts in Ukraine]. Kharkiv: FOP Panov A.M., 236.*
6. *Semenova, I., Sumak, K. (2017). Cyclonic activity in cold season over territories of Belarus and Ukraine and its relation to the warm season droughts. Croatian Meteorological Journal, 52 (52), 59-73.*
7. *IPCC (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of WG I to the 5th Assessment Report of the IPCC [Stocker, T.F., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 1535.*
8. *Semenova, I.H., Introligator, O.A. (2018). Tendentsiy maybutniy zmin u rezhimi opadiv v Ukraini v litniy period 2020-2050 rr. [Trends of future changes in the precipitation in Ukraine in the summer 2020-2050]. Geografiya ta turizm, 42, 132-142.*
9. *McKee, T.B., Doesken, N.J., Kliest, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim (USA), 179-184.*
10. *Svoboda, M., Hayes, M., Wood, D. (2012). Standardized Precipitation Index User Guide. WMO - No. 1090. Geneva, 17.*
11. *Semenova I.H. (2015). Prostranstvenno-vremennoye raspredeleniye zasukh v Ukraine v usloviyakh budushchego izmeneniya klimata. [Spatiotemporal distribution of droughts in Ukraine under conditions of future climate change]. Fizicheskaya geografiya i geomorfologiya, 1 (77), 144-151.*
12. *Semenova I.H. (2016). Otsenka prostranstvenno-vremennogo raspredeleniya zasukh v Zakarpatskom regione v kratkosrochnoy perspektive do 2050 goda. [Estimation of the spatiotemporal distribution of droughts in the Transcarpathian region in the short term until 2050]. Ukrainskiy gidrometeorologicheskiy zhurnal, 18, 62-68.*
13. *Guerreiro, S.B., Dawson, R.J., Kilsby, C., Lewis E., Ford, A. (2018). Future heat-waves, droughts and floods in 571 European cities. Environ. Res. Lett. 13, 3 034009. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaaad3 .*
14. *Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. Jornal of Climate, 23 (7), 1696–1718.*
15. *Beguería, S., Vicente-Serrano, S.M., Reig, F. and Latorre, B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. Int. J. Climatol., 34, 3001-3023. https://doi.org/10.1002/joc.3887*
16. *Svoboda, M., Fuchs, B.A. (2016). Handbook of Drought Indicators and Indices. Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. Geneva, 46.*
17. *Abramopoulos, F., Rosenzweig, C., Choudhury, B. (1988). Improved ground hydrology calculations for global climate models (GCMs): Soil water movement and evapotranspiration. Journal of Climate, 1, 921–941.*
18. *Thornthwaite, C.W., Mather, J.R. (1957). Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Publications in Climatology. Laboratory of Climatology, Drexel Institute of Technology, Centerton, New Jersey (USA), 10 (3), 183-311.*
19. *Palmer W.C. (1965). Meteorological droughts. U.S. Department of Commerce Weather Bureau, Research Paper 45, 58.*
20. *Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J.I. (2010). A new global 0.5° gridded dataset (1901-2006) of a multiscalar drought index: comparison with current drought index datasets based on the Palmer Drought Severity Index. Journal of Hydrometeorology, 11, 1033-1043.*
21. *Climate Explorer. Available at: http://climexp.knmi.nl/*
22. *SPEI Calculator. Available at: http://digital.csic.es/handle/10261/10002/*