

УДК : 633.171 : 58.056

ТЕНДЕНЦІЯ ЗМІНИ АГРОКЛІМАТИЧНИХ УМОВ ФОРМУВАННЯ УРОЖАЙНОСТІ ПРОСА ДО 2050 РОКУ В СТЕПОВІЙ ЗОНІ УКРАЇНИ

Г. В. Ляшенко, Н. В. Данілова, В. В. Колосовська, А. В. Толмачова

Одеський державний екологічний університет,
вул. Львівська, 15, 65016, Одеса, Україна,
lgv53@ukr.net, nataliadanilova0212@gmail.com, v.kolosv@ukr.net, tolmach@ukr.net

Сучасна тенденція зміни клімату вимагає в аграрній галузі значного перегляду видового та сортового складу сільськогосподарських культур. Перевага повинна надаватися, особливо в Степовій зоні України, посухостійким культурам, однією з яких є просо. Дослідження агрокліматичних умов формування врожайності проса на найближчі роки є дуже актуальними. У статті розглядається оцінка зміни агрокліматичних ресурсів для Північного та Південного Степу України за сценаріями *RCP4.5* та *RCP8.5* за три десятирічні періоди з 2021-2030, 2031-2040 та 2041-2050 рр. в порівнянні з базовим періодом з 1986 по 2005 рр. Використана базова модель оцінки агрокліматичних ресурсів формування продуктивності сільськогосподарських культур А. М. Польового. В моделі використані метеорологічні та агрометеорологічні дані про температуру і вологість повітря, опади, сонячну радіацію, водно-фізичні властивості та вологість ґрунту, які можна отримати за допомогою стандартних метеорологічних та агрометеорологічних спостережень. За допомогою моделі продукційного процесу рослин визначено агрокліматичні ресурси в період вегетації проса, показники фотосинтетичної продуктивності, встановлено закономірності формування різних агроекологічних категорій урожайності та коливання урожайності культури в умовах зміни клімату за тридцятирічний період з 2021 по 2050 рр. Оцінено зміну вказаних показників як за окремі десятирічні періоди так і в розрізі Північного і Південного Степу. Виявлено, що найбільша зміна показників агрокліматичних ресурсів і продуктивності проса відзначається в Південному Степу. Як для Південного, так і для Північного Степу найбільша різниця цих показників спостерігатиметься за сценарієм зміни клімату *RCP8.5*. Також встановлено, що найбільша зміна показників спостерігатиметься в період з 2031 по 2040 рр., а в наступне десятиріччя величини усіх показників є близькими до даних за базовий період (1986-2005 рр.). За результатами розрахунків за період з 2021 по 2050 рр. за сценаріями *RCP4.5* та *RCP8.5* очікуються сценарні урожаї вищі за базовий період.

Ключові слова: зміна клімату, просо, агрокліматичні ресурси, показники фотосинтетичної продуктивності, агроекологічні категорії врожайів, Степова зона України.

1. ВСТУП

Сучасне потепління викликає значну зміну агрокліматичних умов росту, розвитку та формування продуктивності сільськогосподарських культур. Воно супроводжується істотним підвищенням температури повітря у зимові місяці, збільшенням кількості тривалих відлиг, часового зрушення розвитку природних процесів, змінами тривалості сезонів року, подовженням безморозного періоду та тривалості вегетаційного періоду сільськогосподарських культур, збільшенням теплозабезпеченості вегетаційного періоду, деяким покращенням вологозабезпеченості майже усіх зон України. Можливе зростання частоти екстремальних погодних явищ, загальне зни-

ження вологості ґрунтів та зменшення їхньої родючості, виснаження ресурсів прісної води у південних регіонах країни, деградація ґрунтів. Разом з тим, основною особливістю потепління стала нерівномірність випадіння опадів за окремі періоди року, що призвело до збільшення посушливих явищ. Посухи нерідко співпадають з суховіями, спричиняючи пошкодження рослин у різних фазах розвитку та зменшують їхню продуктивність [1].

Посідаючи ключові позиції за розмірами посівних площ, області півдня України не є провідними щодо урожайності та валового збору основних культур, що свідчить про нестабільність виробництва сільськогосподарської продукції у цьому регіоні, великою мірою зумовлену залеж-

ністю урожаю від клімату взагалі та погодних умов конкретного року. З огляду на природний дефіцит вологи найважливішим кліматичним фактором для отримання стабільних урожаїв є кількість і терміни випадіння опадів [2]. Таким чином, головний ризик щодо стабільності урожайності в областях Півдня щодо продовольчої безпеки пов'язаний із посиленням посушливості.

Щоб вирішити цю проблему, наукове співтовариство має знайти альтернативні культури, які можна було б адаптувати і культивувати, незважаючи на глобальне потепління. Одночасно ці культури повинні виділяти менше парникових газів, бути менш ресурсоємними та багатими на основні та другорядні поживні речовини. Просо - це зернова культура, яка володіє багатьма зі згаданих вище бажаних властивостей в порівнянні з іншими основними культурами (наприклад, пшеницею, рисом і кукурудзою) [3]. Просо - витривала зернова культура з коротким вегетаційним періодом, який становить приблизно 60-100 днів залежно від сорту. Це посухостійка культура, яку можна вирощувати в широкому діапазоні кліматичних умов, а також в посушливих районах завдяки потужній кореневій системі [4]. Більш того, дослідники показали, що просо виділяє менше парникових газів, що може сприяти зниженню внеску агропродовольчого сектору в глобальне потепління [3]. Просо може стати основним продуктом харчування для досягнення цілей в області продовольчої та харчової безпеки. В якості заміни просо також користується перевагою через те, що в порівнянні з такими культурами, як кукурудза і рис, воно менш ресурсоємне; тобто вимагає значно нижчої якості ґрунту і меншої кількості води і добрив [5, 6]. Тому, метою цього дослідження є оцінка впливу зміни клімату на прогнозовану врожайність проса в Північному та Південному Степу України.

2. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Короткий огляд досліджень впливу агрометеорологічних умов на врожайність проса в умовах зміни клімату свідчить про те, що для оцінки досліджень автори використовували різні критерії, неоднакові за обсягом і повнотою вибірки; отримані висновки стосуються різних територій і не завжди порівнюються.

Для території Китаю згідно майбутнім кліматичним сценарієм, прийняття кліматично розумного управління стало загальною тенденцією для отримання високих та сталих урожаїв проса. У тематичному дослідженні [7] автори використовували модель DSSAT (Система підтримки

прийняття рішень для передачі агротехнології) для оцінки потенційних майбутніх впливів зміни клімату на вирощування проса на північному сході Китаю. Були запропоновані відповідні заходи для адаптації місцевого вирощування проса до майбутніх змін клімату. У порівнянні з базовим періодом (1988-2018 рр.) урожайність зерна проса зміниться на 15,3% (-8,9%) протягом 2020-х років, -8,8% (-10,5%) протягом 2030-х років, -17,7% (0,4%) протягом 2040-х років і -25,0% (-18,3%) протягом 2050-х років в рамках RCP4.5 та RCP8.5. Відповідно майбутнім кліматичним сценаріям кліматично грамотне управління (наприклад, коригування дати сівби, додаткове зрошення) могло б частково компенсувати несприятливий вплив зміни клімату на врожайність проса.

Для Західної Африки [8] були проведені дослідження вирощування проса в яких застосовувались 35 можливих кліматичних сценаріїв. На основі технології і підтвердженні багаторічних польових спостережень для 35 станції в різних агрокліматичних умовах була використана модель SARRA-H.

Для території Пакистану [10] було використано підхід системного аналізу за допомогою моделі CSM-CERES-Millet для кількісної оцінки зміни клімату та її впливу на просо в посушливих та напівпосушливих кліматичних умовах Пенжабу. Результати за кліматичними сценаріями показали, що відбудеться збільшення мінімальної температури повітря (2,8 °C та 2,9 °C, відповідно для напівпосушливого та посушливого середовища) та максимальної температури повітря (2,5 °C та 2,7 °C, відповідно для напівпосушливого та посушливого середовища) згідно з RCP4.5. Для RCP8.5 спостерігається збільшення мінімальної температури повітря на 4 °C для напівпосушливого та посушливого середовища та збільшення максимальної температури на 3,7 °C та 3,9 °C відповідно для напівпосушливого та посушливого середовища.

Дослідниками [11] модифікована модель CSM-CERES-Pearl проса була використана для оцінки приросту врожаю шляхом модифікації ознак рослин, що визначають тривалість дозрівання врожаю, потенційний урожай та стійкість до посухи та спеки в сортах проса, вирощених у шести місцях посушливої (Гісар, Джодхпур, Біканер) та напівпосушливої (Джайпур, Аурангабад та Біджапур) тропічної Індії та двох місцях в напівпосушливій тропічній Західній Африці (Садоре в Ніамеї та Цинцана в Малі). У всіх місцях дослідження врожайність зменшилася, коли тривалість досягання врожаю зменшилась на

10% як у сучасних, так і в майбутніх кліматичних умовах; однак, 10% збільшення періоду дозрівання врожаю значно збільшило врожайність в Аурангабаді та Біджапурі, але не в інших місцях. Збільшення потенційних ознак урожайності на 10% збільшило врожайність як за кліматичної ситуації в Індії, так і в Західній Африці. За кліматичних змін внесок посухостійкості у врожайність сортів або збільшувався, або зменшувався залежно від зміни кількості опадів на місцях.

В аграрному секторі України просо ніколи не займало провідної ролі серед сільськогосподарських культур. Але воно було і залишається в структурі посівних площ. Підсумовуючи аналіз джерел, слід зазначити, що недостатньо вивченим є вплив зміни клімату на посіви проса при вирощуванні його у посушливих умовах Степу України.

Для Південного Степу України Даніловою Н. В. [12] розглядалися зміни агрокліматичних ресурсів та агрокліматичних умов формування продуктивності проса за різні проміжки часу. Аналіз тенденції зміни клімату виконано шляхом порівняння даних за кліматичними сценаріями *A2* та *A1B* та середніх багаторічних характеристик кліматичних та агрокліматичних показників. Проведена порівняльна характеристика продуктивності проса в умовах зміни клімату за середньо багаторічними даними (1986-2005 рр.) та за сценаріями зміни клімату *A2* і *A1B* (2011-2030 рр. та 2031-2050 рр.).

Аверчевим О. В. [13] висвітлюються питання реакції сортів проса на засолення, підтоплення ґрунтів і вплив умов живлення на врожайність в пожнивних посівах Причорноморського степу України. Результати дослідів по підборі перспективного сорту проса з метою його використання в пожнивних посівах показали, що врожайність коливалася в межах 20-34% по роках досліджень. При цьому розмах варіювання сортів становив від 38% у Веселоподолянського 632 до 49% - у Слобідського і Київського 87. Якщо у вологий 1997 року всі сорту формували досить високий урожай зерна (в середньому 28,5 ц/га), то в наступний сухий рік - в 2,5 рази менше - 11,3 ц/га, що пояснюється істотним впливом умов вирощування (77,8%). За окремими роками сила впливу факторів зовнішнього середовища становила від 14,0 до 57,5%. За результатами екологічного випробування сортів можна вважати, що сорт проса Веселоподолянське 632 є найбільш підходящим для вирощування як у вологі, так і сухі роки, на зрошенні і без нього, що підтверджується показником екологічної стійкості -

відношення врожайності в несприятливих умовах до врожайності в оптимальних умовах.

3. ОПИС МАТЕРІАЛІВ І МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Аналіз тенденції зміни клімату виконано шляхом порівняння середніх багаторічних характеристик кліматичних та агрокліматичних показників за середньо багаторічний період з 1986 по 2005 рр. (базовий період) [14] з кліматичними сценаріями *RCP4.5* (сценарій стабілізації рівнів парникових газів) та *RCP8.5* (сценарій з дуже високими рівнями викидів парникових газів) [15] за три сценарних періоди: з 2021 по 2030 рр. (I-й сценарний період), 2031 по 2040 рр. (II-й сценарний період), 2041 по 2050 рр. (III-й сценарний період). Для розрахунків використана базова модель оцінки агрокліматичних ресурсів формування та продуктивності сільськогосподарських культур А. М. Польового [16], яка була модифікована та адаптована з використанням польових спостережень за фенологією, ростом та урожайністю зерна. Базова модель оцінки агрокліматичних ресурсів формування продуктивності сільськогосподарських культур заснована на концепції максимальної продуктивності рослин та має блочну структуру. Враховуючи біологічні особливості культури проса, дозрівання якої проходить трьома етапами, нами моделюються три фази дозрівання зерна проса у волоті. Адаптація складалась з уточнення параметрів моделі. До їх числа входить визначення онтогенетичної кривої фотосинтезу, в якій параметр Σt_i характеризує період, коли спостерігається максимальна інтенсивність фотосинтезу культури.

Предметом досліджень є умови формування агрокліматичних ресурсів, які об'єднують ресурси світла, тепла і вологи, закономірності їх географічної мінливості та їх вплив на ріст, розвиток і формування врожаю проса.

Аналіз потенційного урожаю (*ПУ*), метеорологічно можливого урожаю (*ММУ*), дійсно можливого урожаю (*ДМУ*), урожаю у виробництві (*УВ*), а також їхніх співвідношень і відмінностей дозволяє судити про природні й антропогенні ресурси сільського господарства, а також про ефективність господарського використання цих ресурсів стосовно вирощування проса.

Підвищення рівня $УВ_{зерна}$ і доведення його до $ДМУ_{зерна}$ вимагає ретельного дотримання всіх засобів агротехніки, виконання їх у повній відповідності з агрометеорологічними умовами на конкретному полі. Це є першочерговою задачею

програмування урожаїв, спрямованого на усунення дії різноманітних господарських факторів, які знаходяться у мінімумі.

Наближення $ДМУ_{зерна}$ до $ММУ_{зерна}$ вимагає виконання різноманітних заходів для підвищення родючості ґрунту. Різниця між $ММУ_{зерна}$ і $ПУ_{зерна}$ компенсується за рахунок меліоративних заходів, а також внаслідок правильного підбору сортів і культур, що краще пристосовані до особливостей конкретного клімату. Підвищення рівня $ПУ_{зерна}$ забезпечується головним чином шляхом селекції нових сортів, які будуть мати більш високий рівень урожайності за рахунок ефективного використання сонячної радіації.

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Були проаналізовані агрокліматичні умови в Північному та Південному Степу за вегетаційний період проса за період з 1986 по 2005 рр. та за тридцятирічний період з 2021 по 2050 рр., який був розбитий на десятиріччя за сценаріями $RCP4.5$ та $RCP8.5$.

Розглянемо агрокліматичні умови для Північного Степу.

За середньо багаторічними даними (базовий період) середня температура повітря складає $18,4^{\circ}\text{C}$. За умови реалізації сценарію $RCP4.5$ середня температура повітря в I-й та II-й періоди буде нижче на $0,6$ та $0,5^{\circ}\text{C}$, порівняно з базовим періодом, а в III-й період - на $0,2^{\circ}\text{C}$ (табл. 1).

Кількість опадів за вегетаційний період проса в за базовий період складає 179 мм. В I-й період кількість опадів зменшиться 33 мм і складатиме 146 мм. В II-й період кількість опадів буде близькою до величини базового періоду – 177 мм, а в III-й період – 119 мм, що на 60 мм менше за величину базового періоду (табл. 1).

За кліматичним сценарієм $RCP4.5$ за період сходи – повна стиглість сумарне випаровування знизиться з 365 мм до 282 мм в I-й період і до 302 мм в II-й період. Випаровуваність збільшиться з 711 мм до 730 мм в I-й період і до 846 мм в II-й період. Як наслідок зменшення кількості опадів погіршаться і умови вологозабезпеченості посівів - відповідно до 76 і 78% від величини базового періоду.

Таблиця 1 – Агrometeorological conditions of millet vegetation (during the period of germination - full maturity) in the Northern Steppe for the base period (1986-2005) and until 2050 according to climate change scenarios $RCP4.5$ and $RCP8.5$

Table 1 – Agrometeorological conditions of millet vegetation (during the period of germination - full maturity) in the Northern Steppe for the base period (1986-2005) and until 2050 according to climate change scenarios $RCP4.5$ and $RCP8.5$

Період, сценарій	Середня температура повітря за період, $^{\circ}\text{C}$	Кількість опадів за період, мм	Сумарне випаровування за період (E), мм	Випаровуваність за період, (E_0), мм	Вологозабезпеченість (E/E_0), відн.од.	Сума ФАР, $\text{кДж}/\text{см}^2$ за період
Базовий період 1986-2005	18,4	179	365	711	0,51	105,0
<i>RCP4.5</i>						
I – й 2021–2030	17,8	146	282	730	0,39	132,1
II – й 2031–2040	17,9	177	302	746	0,40	128,7
III – й 2041–2050	18,2	119	249	833	0,30	120,9
<i>RCP8.5</i>						
I – й 2021–2030	18,3	137	271	766	0,35	132,9
II – й 2031–2040	18,5	128	227	844	0,27	132,4
III – й 2041–2050	18,6	175	309	752	0,41	130,7

В III-й період сумарне випаровування зменшиться до 249 мм, а випаровуваність збільшиться на 833 мм, в порівнянні з базовим періодом. В цей період умови вологозабезпеченості будуть гіршими, в порівнянні з I-м і II-м періодом, а відносно базового періоду ця величина не перевищує 59% (табл. 1).

За базовий період величина фотосинтетично активної радіації (ΦAP) за вегетаційний період проса складає 105,0 кДж/см². За сценарієм *RCP4.5* в I-й та II-й періоди очікується збільшення ΦAP до 132,2 та 128,7 кДж/см², що складає 126 та 123% від базового періоду. В III-й період величина ΦAP буде нижчою, ніж в I-му та II-му періодах, але вищою, ніж за базовий період і складатиме 120,9 кДж/см² – 115% (табл. 1).

За базовий період $ПУ$ всієї сухої маси проса складає 1651 кДж/см². В I-й і II-й періоди $ПУ$ збільшиться до 2057 та 1999 г/м²дек, що складає 126 та 121%, а в III-й період - 115% від величини за базовий період (табл. 2).

Рівень метеорологічно можливого урожаю ($ММУ$), який залежить від факторів тепла і вологості, в базовий період складає 852 м²/м². В I-й та II-й періоди $ММУ$ зростає до 897 та 865 г/м²дек, що складатиме 105 та 102% від величини базового періоду. В III-й період, через погіршення умов вологозабезпеченості, $ММУ$ зменшиться до

767 г/м²дек, що складатиме 90% від величини базового періоду (табл. 2).

Під впливом зміни агрокліматичних умов вирощування проса, які розглянуто вище, відбудеться зміна показників фотосинтетичної продуктивності культури, до яких в першу чергу відноситься площа асимілюючої поверхні посівів.

За умови реалізації сценарію *RCP4.5* через зміну агрокліматичних умов впродовж усього періоду вегетації проса площа листкової поверхні в три наступні десятирічні періоди буде меншою (рис. 1а), порівняно з базовим періодом. Так в I-й та II-й періоди площа листкової поверхні в період її максимального розвитку буде становити 4,04 і 3,94 проти 4,74 м²/м² в базовий період. В III-й період очікується збільшення площі листкової поверхні до 4,48 м²/м².

Фотосинтетичний потенціал ($\Phi П$) за базовий за сценарієм *RCP4.5* знизиться від 217,8 м²/м² (в базовий період) до 210,6, 189 і 194,6 м²/м² відповідно в I - III-й періоди (табл. 2).

Величина дійсно можливого врожаю ($ДМУ$), яка визначається з урахуванням природної родючості ґрунту, основним показником якої є баланс гумусу у ґрунті. Баланс гумусу під посівами проса складатиме в перші два періоди 105 і 101% від величини в базовий період, а в III-й період він зменшиться до 91%.

Таблиця 2 – Характеристика забезпеченого агрокліматичними умовами урожаю проса в Північному Степу за базовий період (1980-2005 рр.) і до 2050 року за сценаріями зміни клімату *RCP4.5* та *RCP8.5*

Table 2 – Characteristics of agro-climatic conditions of millet harvest in the Northern Steppe for the base period (1980-2005) and until 2050 according to the climate change scenarios *RCP4.5* and *RCP8.5*

Період, сценарій	Вся суха маса, г/м ² дек			Фотосинтетичний потенціал, м ² /м ² за період	Баланс гумусу, т/га	Урожай проса при вологості 14 %, т/га
	потенційного урожаю	метеорологічно можливого урожаю	дійсно можливого урожаю			
Базовий період (1986-2005)	1651	852	528	189,4	0,074	2,41
<i>RCP4.5</i>						
I – й 2021–2030	2057	897	556	266,4	0,078	2,54
II – й 2031–2040	1999	865	536	293,3	0,075	2,44
III – й 2041–2050	1899	767	476	239,3	0,067	2,17
<i>RCP8.5</i>						
I – й 2021–2030	1907	877	544	269,2	0,076	2,48
II – й 2031–2040	1896	769	477	263,2	0,067	2,17
III – й 2041–2050	1872	940	583	276,6	0,082	2,66

В I-й і II-й періоди величина ДМУ зростає до 556 та 536 г/м²дек, що складатиме 105 та 102% від величини в базовий період. В III-й період ДМУ зменшиться до 476 г/м²дек, що складатиме 90% від величини в базовий період.

Урожай проса за 14%-й вологості зерна в базовий період становить 2,41 т/га (табл. 2). В перші два періоди (2021-2030 і 2031-2040 рр.) урожай зростає до 2,54 та 2,44 т/га, що становитиме 105 та 101% від величини базового періоду, а в III-й період урожай зменшиться до 2,17 т/га, тобто до 90% від величини базового періоду (табл. 2).

При реалізації сценарію RCP8.5 середня температура повітря в період сходи – повна

стиглість в I-й період зменшиться на 0,1 °С від температури за базовий період, а в II-й і III-й періоди спостерігається підвищення температури - на 0,1 та 0,2 °С відповідно (табл. 1).

Кількість опадів I-й і II-й періоди буде нижчою від величини за базовий період на 42 та 51 мм. В III-й період кількість опадів буде близькою до величини за базовий період і складатиме 175 мм, що на 4 мм менше величини за базовий період (табл. 1).

Сумарне випаровування в I-й та III-й періоди зменшиться на 94 і 56 мм. Найбільша величина випаровування буде спостерігатися в II-й період і складатиме 227 мм, що менше від величини за базовий період на 138 мм.

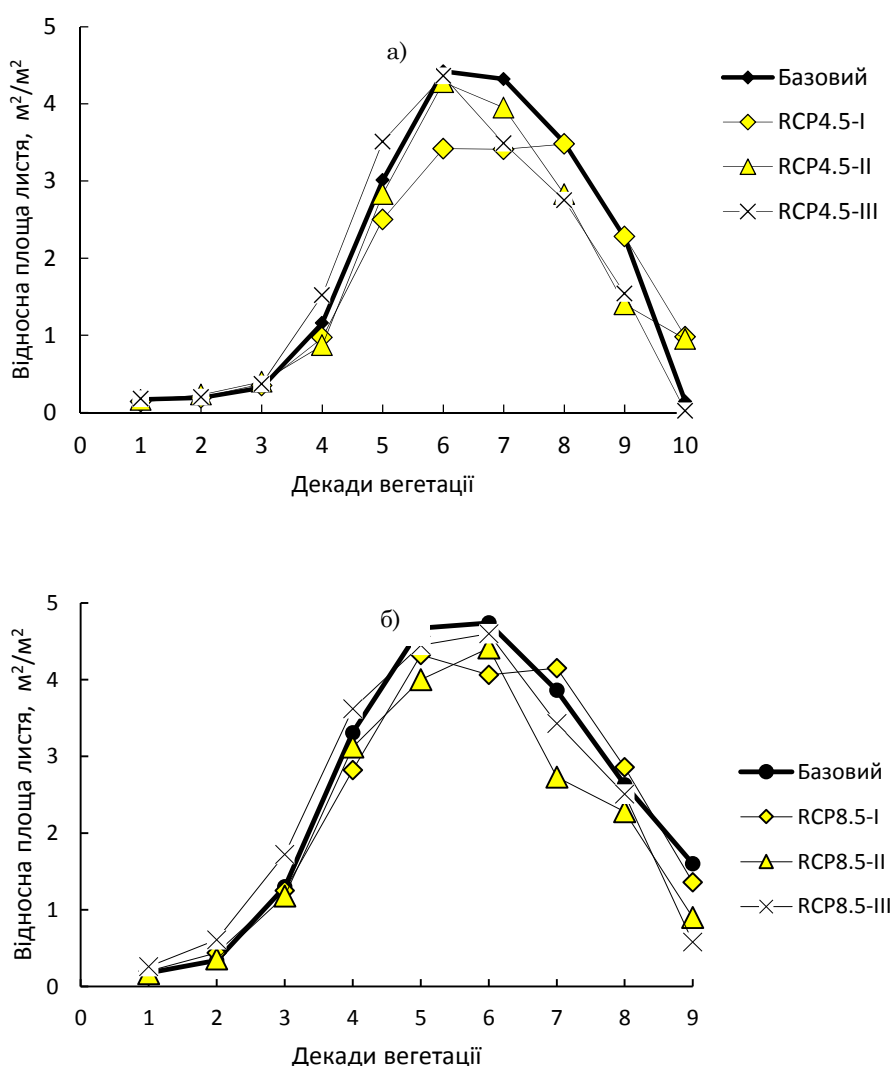


Рис. 1 – Характеристика динаміки площі листя проса впродовж вегетаційного періоду за базовий період та розрахункові дані за наступні три десятиріччя в Північному Степу за сценарієм RCP4.5 (а) та RCP8.5 (б)

Fig 1 – Characteristics of millet leaf area dynamics during the growing season for the base period and estimates for the next three decades in the Northern Steppe under scenarios RCP4.5 (a) and RCP8.5 (b)

Випаровуваність в І-й та III-й періоди зростає до 766 та 752 мм, а II-й період – до 844 мм, що вище від величини за базовий період на 55, 41 і 133 мм. Звідси наочно видно, що II-й період умови вологозабезпеченості будуть гіршими, ніж в І-й та III-й періоди і складатимуть тільки 53% від величини за базовий період.

При реалізації сценарію *RCP8.5* за період сходи – повна стиглість, як і за сценарієм *RCP4.5*, спостерігатиметься збільшення *ФАР* в порівнянні з базовим періодом. Так, величина *ФАР* за сценарієм *RCP8.5* в І-й та II-й періоди зростає до 127 та 126%, а в III-й період - знизиться до 113% від базового періоду (табл. 1).

Відповідно в І-й та II-й періоди буде відзначатися зростання *ПУ* до 1907 та 1896 г/м², що складає 116 та 115% від величини базового періоду. В III-й період буде спостерігатись незначне зниження *ПУ* до 1872 г/м², що складатиме 113% від величини базового періоду (табл. 2).

За умовами реалізації сценарію *RCP8.5* очікується підвищення *ММУ* в І-й і III-й періоди до 877 та 940 г/м²дек, а в II-й період *ММУ* зменшиться до 769 г/м²дек, що становить 103, 110 і 90% від величини за базовий період (табл. 2).

Баланс гумусу під посівами проса в І-й та III-й періоди зростає до 103 та 111%, а в II-й період зменшиться до 90% від величини за базовий період (табл. 2). Величина *ДМУ* в І-й та III-й періоди зростає до 544 та 583 г/м²дек, що складає 103 та 110% від середньо багаторічного. В II-й період *ДМУ* зменшиться до 477 г/м²дек, що становить 90% від середньо багаторічного (табл. 2).

Рівень формування площі листя в впродовж вегетації проса (рис.16) за умови реалізації сценарію *RCP8.5* буде нижчим, порівняно з базовим періодом. В І-й та II-й періоди площа листової поверхні в період її максимального розвитку зменшиться з 4,74 до 4,32 та 4,41 м²/м². В III-й період, із-за кращих умов тепло- та вологозабезпеченості, очікується трохи вищий рівень площі листя, що складатиме 4,6 м²/м².

Фотосинтетичний потенціал *ФП* за І-й та III-й періоди зростає до 218,5 і 221,0 м²/м², а в II-й період спостерігається його зменшення до 195,3 м²/м², в порівнянні з середньо багаторічним значенням (табл. 2).

За сценарієм *RCP8.5* урожаєм проса при 14%-й вологості в І-й та III-й періоди зростає до 2,48 і 2,66 т/га, що складатиме 103 та 110% від середньо багаторічного. В II-й період, із-за гірших агрокліматичних умов, буде спостерігатись зниження урожаю до 2,17 т/га, що складає 90% від середньо багаторічного (табл. 2).

Аналогічні дослідження були проведені для території Південного Степу.

За умови сценарію *RCP4.5* в наступні три десятиріччя, порівняно з базовим періодом, ріст та розвиток проса буде проходити за дещо нижчого рівня температури повітря. Так, в І-й і III-й періоди температура повітря знизиться на 0,4 і 0,3 °С від температури за базовий період (18,7 °С), а в II-й період - на 0,5 °С (табл. 3).

Кількість опадів за вегетаційний період проса в базовий період складає 158 мм. В І-й і III-й періоди буде спостерігатись зменшення кількості опадів на 54 і 39, а в II-й – на 25 мм відносно базового періоду. Сумарне випаровування в І-й та III-й періоди знизиться на 111 і 74, а в II-й період – на 84 мм, в порівнянні з базовим періодом (343 мм).

Підвищення температури призведе до підвищення випаровуваності, що потім, в свою чергу, спричинить погіршення умов вологозабезпеченості посівів. Так, в базовий період випаровуваність складає 805 мм. В І-й та III-й періоди вона зростає до 942 і 965 мм, а в II-й період – до 870 мм, що вище на 137, 160 і 65 мм від величини за базовий період.

За середніми багаторічними даними вологозабезпеченість складає 0,41 відн.од. В І-й й III-й розрахункові періоди вологозабезпеченість посівів проса складатиме тільки 60 і 63% від величини за базовий період, а в II-й період, у зв'язку із збільшенням кількості опадів, вологозабезпеченість дещо збільшиться, але на перевищить величину базового періоду – 84% (табл. 3).

Величина *ФАР* за період сходи – повна стиглість за середньо багаторічними даними складає 119,3 кДж/см². За умовами реалізації сценарію *RCP4.5* в І-й та III-й періоди буде спостерігатись підвищення *ФАР* до 138,3 та 134,3 кДж/см², що близько 113% від величини за базовий період. В II-й період очікується збільшення цієї величини до 146,6 кДж/см² - 123% від величини за базовий період (табл. 3).

За базовий період *ПУ* складає 1805 г/м²дек. В наступні три десятиріччя (І-III-й розрахункові періоди) буде відзначатися збільшення цього показника врожайності відповідно до 2096, 2120 і 1923 г/м²дек, що складає від величини в базовий період 116, 118 і 101% (табл. 4).

ММУ, який визначається умовами тепло- і вологозабезпеченості, в базовий період досягає 787 г/м²дек. В І-й й III-й періоди спостерігатиметься його зменшення до 744 і 773 г/м²дек, що складає 94 та 98% від величини за базовий період. В II-й період ця величина буде близькою до

ММУ за базовий період - 788 г/м²дек.

Баланс гумусу у ґрунті під посівами проса складатиме в I-III-й періоди відповідно 96, 100 і 99% від величини за базовий період (табл. 4).

ДМУ всієї сухої маси проса становитиме в I-й й III-й 454 і 472 г/м²дек., що складає 94 і 98 % від величини за базовий період - 480 г/м²дек. В II-й період ДМУ зросте до 481 г/м²дек.

Таблиця 3 – Агrometeorологічні умови вегетації проса (за період сходів – повна стиглість) в Південному Степу за базовий період (1986-2005 рр.) і до 2050 року за сценаріями зміни клімату RCP4.5 та RCP8.5

Table 3 – Agrometeorological conditions of millet vegetation (during the period of germination - full maturity) in the Southern Steppe for the base period (1986-2005) and until 2050 according to climate change scenarios RCP4.5 and RCP8.5

і за сценаріями зміни клімату RCP4.5 та RCP8.5 Період, сценарій	Середня температура повітря за період, °С	Сума опадів за період, мм	Сумарне випаровування за період (E), мм	Випаровуваність за період, (E ₀), мм	Вологозабезпеченість (E/E ₀), відн.од.	Сума ФАР, кДж/см ² за період
Базовий період 1986-2005	18,7	158	343	805	0,43	119,3
RCP4.5						
I – й 2021–2030	18,3	104	246	942	0,26	138,3
II – й 2031–2040	18,2	133	232	870	0,26	146,4
III – й 2041–2050	18,4	119	259	965	0,27	134,3
RCP8.5						
I – й 2021–2030	19,2	142	269	875	0,31	136,5
II – й 2031–2040	19,4	117	228	965	0,24	137,0
III – й 2041–2050	18,2	122	264	910	0,29	124,2

Таблиця 4 – Характеристика забезпеченого агрокліматичними умовами урожаю проса в Південному Степу за базовий період (1980-2005 рр.) і до 2050 року за сценаріями зміни клімату RCP4.5 та RCP8.5

Table 4 – Characteristics of agro-climatic conditions of millet harvest in the Southern Steppe for the base period (1980-2005) and until 2050 according to the climate change scenarios RCP4.5 and RCP8.5

Період, сценарій	Вся суха маса, г/м ² дек			Фотосинтетичний потенціал, м ² /м ² за період	Баланс гумусу, т/га	Урожай проса при вологості 14 %, т/га
	потенційного урожаю	метеорологічно можливого урожаю	дійсно можливого урожаю			
Базовий період 1986-2005	1805	787	480	210,3	0,067	2,19
RCP4.5						
I – й 2021–2030	2096	744	454	247,2	0,064	2,07
II – й 2031–2040	2120	788	481	299,4	0,067	2,19
III – й 2041–2050	1923	773	472	273,1	0,066	2,15
RCP8.5						
I – й 2021–2030	1954	846	516	277,4	0,072	2,35
II – й 2031–2040	1962	726	443	249,3	0,062	2,02
III – й 2041–2050	2114	965	528	279,3	0,074	2,41

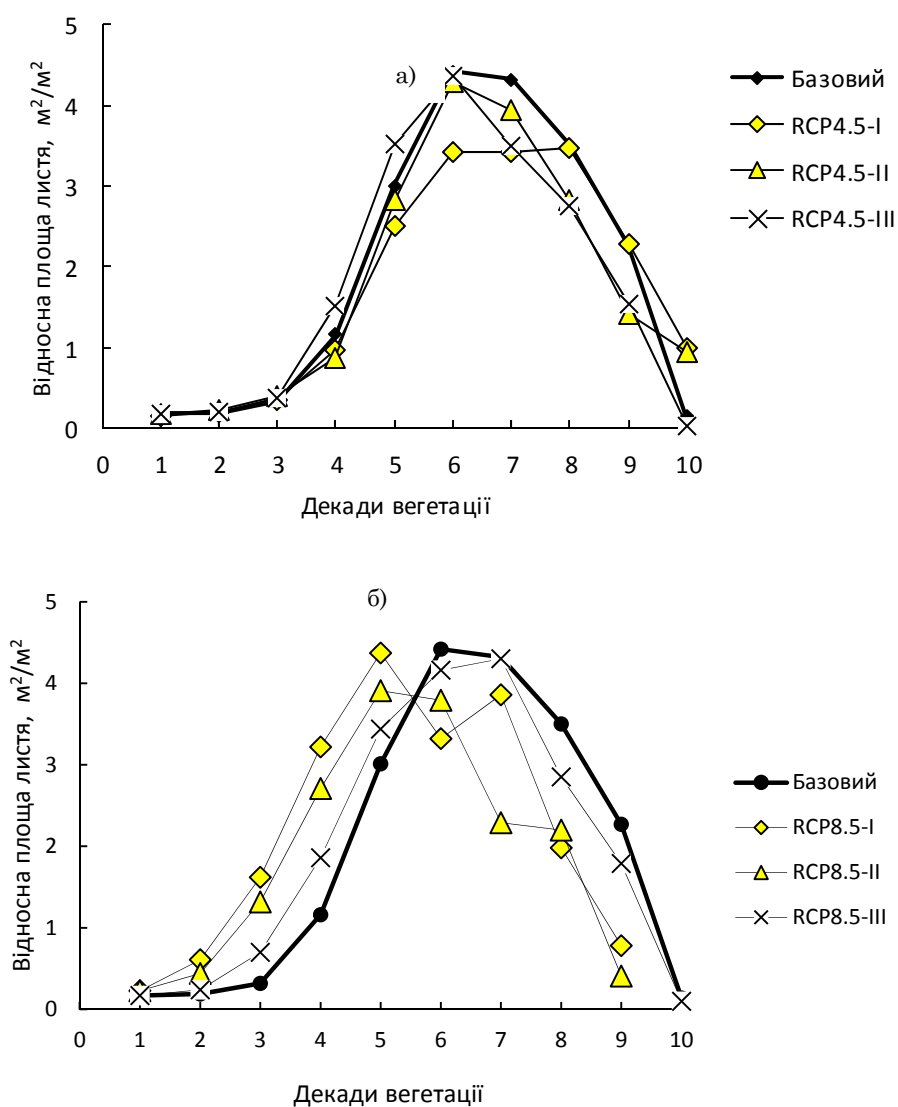


Рис. 2 – Динаміка площі листа проса за вегетаційний період в Південному Степу в базовий період і до 2050 року за сценарієм *RCP4.5* (а) та *RCP8.5* (б)

Fig 2 – Dynamics of millet leaf area during the vegetation period in the Southern Steppe in the base period and until 2050 under the scenario *RCP4.5* (a) and *RCP8.5* (b)

Як і в Північному Степу, площа листкової поверхні впродовж усієї вегетації проса в розрахункові періоди буде меншою, ніж в базовий період (рис. 2а). Так, за сценарієм *RCP4.5* площа листкової поверхні в період максимального розвитку, за базовий період складає $4,42 \text{ м}^2/\text{м}^2$, а в наступні десятирічкі відповідно $3,42$, $4,28$ і $4,36 \text{ м}^2/\text{м}^2$.

Фотосинтетичний потенціал (*ФП*) за умови реалізації сценарію *RCP4.5* за базовий період складає $198,0 \text{ м}^2/\text{м}^2$. В I-й та III-й періоди його величина знизиться до $180,9$ і $182,3 \text{ м}^2/\text{м}^2$, в II-й період буде ще меншою - $179,1 \text{ м}^2/\text{м}^2$ (табл. 4).

Урожай проса за 14%-й вологості в базовий період $2,19 \text{ т/га}$. В I-й та III-й періоди урожай проса знизиться до $2,07$ і $2,15 \text{ т/га}$, що складатиме 95 та 98% від величини за базовий період. В II-й період урожай проса очікується на рівні величини базового періоду (табл. 4).

При реалізації сценарію *RCP8.5* середня температура повітря в період сходи – повна стиглість в I-й та II-й сценарні періоди складатиме $19,2$ та $19,4 \text{ }^\circ\text{C}$, що вище від температури за базовий період на $0,5$ та $0,7 \text{ }^\circ\text{C}$. В III-й період середня температура повітря буде нижчою на $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ і становитиме $18,2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Кількість опадів в I-й та III-й періоди зменшиться відносно базового періоду на 16 і 36 мм, а в II-й період очікується найменша кількість опадів - 117 мм (на 41 мм менше від базової) (табл. 3).

Сумарне випаровування в I-й та III-й періоди зменшиться від величини за базовий період на 74 та 79 мм. В II-й період спостерігається найменше сумарне випаровування - 228 мм, що на 115 мм менше від величини за базовий період.

Випаровуваність в I-й та II-й періоди зросте до 875 і 910 мм, що вище від величини в базовий період на 70 і 105 мм. В II-й період, у зв'язку із підвищенням температури, зросте і випаровуваність до 965 мм, що вище, ніж в базовий період на 160 мм.

Вологозабезпеченість посівів проса в I-й та III-й періоди зменшиться, порівняно із базовим періодом, до 72 та 67%. В II-й період вологозабезпеченість буде найменша - 56% від величини за базовий період (табл. 3).

При реалізації сценарію RCP8.5 за період сходи – повна стиглість спостерігається збільшення ΦAP в порівнянні з величиною за базовий період, але в порівнянні зі сценарієм RCP4.5 - зниження величин в усі розрахункові періоди. Так в I-й та в II-й періоди ΦAP складає 136,5 і 137 кДж/см², що становить 114 та 115% від величини за базовий період. В III-й період величина ΦAP зменшиться до 124,2 кДж/см² - 104% від величини за базовий період (табл. 3).

Так як, $ПУ$ всієї сухої маси проса залежить від ΦAP , то за сценарієм RCP8.5 також буде спостерігатися ріст $ПУ$. В I-й та II-й періоди $ПУ$ зросте до 1954 та 1962 г/м²дек, тобто до 108 і 109% від величини за базовий період. В III-й період величина $ПУ$ збільшиться до 2114 г/м²дек - 117% від $ПУ$ за базовий період (табл. 4).

За умови реалізації сценарію RCP8.5 в I-й та III-й період величина $ММУ$ становить 846 і 865 г/м²дек, що складає 107 та 110% від величини в базовий період. В III-й період очікується зниження $ММУ$ до 726 г/м²дек, що складає 92% від величини в базовий період (табл. 4).

Баланс гумусу під посівами проса складатиме в I-й та III-й періоду 107 та 110%, а в II-й період знизиться до 93% від середньо багаторічного (табл. 4).

Найбільша величина $ДМУ$, як і $ММУ$, буде відзначається в I-й та III-й періоди і становитиме 516 та 528 г/м²дек, що становить 108 та 110% від величини за базовий період. В II-й період про-

стежується зниження $ДМУ$ до 443 г/м²дек - 92% від величини за базовий період (табл. 4).

Площа листової поверхні проса, як показник фотосинтетичної продуктивності посівів, в усі розрахункові періоди за сценарієм RCP8.5 буде меншою, ніж в базовий період (рис.2б). Так, в I-й та III-й періоди площа листової поверхні в період максимального розвитку становить 4,37 і 4,30 м²/м² за 4,42 м²/м² в базовий період. В II-й період очікується трохи зменшення площі до 3,91 м²/м².

$\Phi П$ за умовами реалізації сценарію RCP8.5 в базовий період складає 198,0 м²/м². В I-й та III-й $\Phi П$ зросте 204,0 і 199,8 м²/м², а в II-й період - знизиться до 176,4 м²/м² (табл. 4).

За сценарієм RCP8.5 урожай проса за 14%-й вологості в I-й та III-й періоди буде вищим, а в II-й період нижчим, ніж в базовий період і відповідно будуть складати 2,35, 2,41 і 2,02 т/га, що становить 107, 110 і 92% від величини за базовий період (табл. 4).

5. ВИСНОВКИ

Результати проведених досліджень щодо впливу зміни клімату на фотосинтетичну діяльність посівів проса і формування його врожайності в Степовій зоні України вказують на значну мінливість як агрокліматичних ресурсів, так і зумовлених ними врожаїв проса, впродовж 3-х десятирічок (2021-2030, 2031-2040 і 2041-2050 рр.). Виявлено, що загальні закономірності цієї мінливості повторюються для сценаріїв RCP4.5 і RCP8.5, але рівень мінливості більший за сценарієм RCP8.5. Також встановлено, що найбільші зміни будуть відзначатися в період з 2031 до 2040 рр., а в період з 2041 до 2050 року величини показників агрокліматичних ресурсів будуть наближуватися до ресурсів періоду 1986-2005 рр. Відзначається також дещо кращі умови для проса простежуються за обох сценаріїв зміни клімату в Північному Степу, ніж в Південному Степу.

Отримані результати дослідження впливу зміни клімату на агрокліматичні умови формування продуктивності проса для Степової зони України майже цілком відповідають результатам аналогічних досліджень [12-13], Китаю [7], країн Африки та Азії [8-11].

Треба відзначити актуальність подальших до-

сліджень у цьому напрямку із застосуванням інших відомих моделей та сценаріїв зміни клімату.

При цьому, необхідно вказати на загальний низький рівень врожайів сучасних сортів проса, що вказує на актуальність введення у виробництво нових, більш врожайних сортів та агрокліматичного обґрунтування сучасних технологій його вирощування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Польовий А. М. Оцінка впливу змін клімату на зміни агрокліматичних ресурсів Луганського регіону, умови росту та продуктивність сільськогосподарських культур і природної рослинності: звіт. / МБО «Інститут розвитку територіальних громад», 2012. С. 58.
2. Івані Жужанна. Підвищення стійкості до зміни клімату сільськогосподарського сектору Півдня України / Регіональний Екологічний Центр для Центральної та Східної Європи. Сентендре: Угорщина. Жовтень, 2015. С. 5-7.
3. Greenhouse gases emission from soils under major crops in northwest India / Jain N. et al. *Sci. Total Environ.* 2016. 542. Pp. 551–561. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.073>.
4. Jain R., Bal S. Properties of pearl millet. *J. Agric. Eng. Res.* 1997. 66. Pp. 85–91. <https://doi.org/10.1006/jaer.1996.0119>.
5. Agronomic performance of high-yielding rice variety grown under alternate wetting and drying irrigation. / Yao F. et al. *Field Crops Res.* 2012. 126. Pp. 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.09.018>.
6. Effect of Climate Change on the Yield of Cereal Crops: A Review / Jin Wang et al. *Climate.* 2018. 6(2). P.41. <https://doi.org/10.3390/cli6020041>.
7. A case study of climate-smart management in foxtail millet (*Setaria italica*) production under future climate change in Lishu county of Jilin, China / Tao Liu et al. *Agricultural and Forest Meteorology.* 2020. 15. Pp. 292–293. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108131>.
8. Assessing climate change impacts on sorghum and millet yields in the Sudanian and Sahelian savannas of West Africa / Sultan B. et al. *Environment Research Letters.* 2013. 8. Pp. 9. <https://doi:10.1088/1748-9326/8/1/014040>.
9. Exploring Potential of Pearl Millet Germplasm Association Panel for Association Mapping of Drought Tolerance Traits / Sehgal D. et al. *PLoS ONE.* 2015. 10(5): e0122165. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122165>.
10. Assessing climate change impacts on pearl millet under arid and semi-arid environments using CSM-CERES-Millet model / Ullah A. et al. *Environ Sci Pollut Res.* 2019. 26. Pp. 6745–6757. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3925-7>.
11. An assessment of yield gains under climate change due to genetic modification of pearl millet / Piara Singh et al. *Science of The Total Environment.* 2017. 1. Pp. 1226-1237. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.002>.
12. Данілова Н. В. Оцінка зміни агрокліматичних умов вирощування проса в південних областях України в зв'язку зі зміною клімату. *Український гідрометеорологічний журнал.* 2016. Вип. 17. С. 93-101. <https://doi.org/10.31481/uhmj.17.2016.11>

13. Аверчев О. В. Адаптивність сортів проса до ґрунтових особливостей Причорноморського степу України. *Вісник Уманського національного університету садівництва.* 2014. Вип. 2. С. 75-79.
14. Агрокліматичний довідник по території України / за ред. Т. І. Адаменко, М. І. Кульбиди, А. Л. Прокопенко. Кам'янець-Подільський, 2011. 107 с.
15. The impact of emission and climate change on ozone in the United States under representative concentration pathways (RCPs) / Gao I Y. et al. *Atmos. Chem. Phys.* 2013. 13. Pp. 607-621. <https://doi.org/10.5194/acp-13-9607-2013>.
16. Польовий А. М. Моделювання гідрометеорологічного режиму та продуктивності агрокосистем: Київ: КНТ, 2007. 344 с.

REFERENCES

1. Pol'ovyi, A.M. (2012). *Otsinka vplyvu zmin klimatu na zminy ahroklimatychnykh resursiv Luhans'koho rehionu, umovy rostu ta produktyvnist' sil'skohospodars'kykh kul'tur i pryrodnoyi roshlynnosti. [Assessing the impact of climate change on changes in agro-climatic resources of Lugansk region, the conditions of growth and productivity of crops and natural vegetation]*. IBO "Institute for the Development of Territorial Communities". (in Ukr.)
2. Ivani, Zhuzhanna. (2012). *Pidvyshchennya stiykosti do zminy klimatu sil'skohospodars'koho sektoru Pivdnia Ukrainy [Increased resistance to climate change agricultural sector of the South Ukraine]*. Regional Environmental Center for Central and Eastern Europe. Sentendre, Uhorshchyna. October. Pp. 5-7. (in Ukr.)
3. Jain, N. et al. (2016). Greenhouse gases emission from soils under major crops in northwest India. *Sci. Total Environ.* 542, pp. 551–561. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.10.073>.
4. Jain, R., Bal, S. (1997). Properties of pearl millet. *J. Agric. Eng. Res.* 66, pp 85–91. <https://doi.org/10.1006/jaer.1996.0119>
5. Yao, F. et al. (2012). Agronomic performance of high-yielding rice variety grown under alternate wetting and drying irrigation. *Field Crops Res.* 126, pp. 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.09.018>.
6. Jin, Wang et al. (2018). Effect of Climate Change on the Yield of Cereal Crops: A Review. *Climate*, 6(2), p. 41. <https://doi.org/10.3390/cli6020041>.
7. Tao, Liu et al. (2020). A case study of climate-smart management in foxtail millet (*Setaria italica*) production under future climate change in Lishu county of Jilin, China. *Agricultural and Forest Meteorology.* 15, pp. 292–293. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108131>.
8. Sultan, B. et al. (2013). Assessing climate change impacts on sorghum and millet yields in the Sudanian and Sahelian savannas of West Africa. *Environment Research Letters*, 8, p. 9. <https://doi:10.1088/1748-9326/8/1/014040>.
9. Sehgal, D. et al. (2015). Exploring Potential of Pearl Millet Germplasm Association Panel for Association Mapping of Drought Tolerance Traits. *PLoS ONE*, 10(5): e0122165. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0122165>.
10. Ullah, A. et al. (2019). Assessing climate change impacts on pearl millet under arid and semi-arid environments using CSM-CERES-Millet model. *Environ Sci Pollut Res.* 26, pp. 6745–6757. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-3925-7>.
11. Piara, Singh et al. (2017). An assessment of yield gains under climate change due to genetic modification of pearl millet. *Science of The Total Environment*, 1, pp. 1226-1237. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.002>.

12. Danilova, N.V. (2016). [Assessment of changes in agro-climatic conditions of millet cultivation in the southern regions of Ukraine due to climate change]. *Ukrain's'kij gidrometeorologičnij žurnal [Ukrainian hydrometeorological journal]*, 17, pp. 93-101. (in Ukr.). <https://doi.org/10.31481/uhmj.17.2016.11>
13. Averchev, O.V. (2014). [Adaptability of millet varieties to soil features of the Black Sea steppe of Ukraine]. *Visnyk Umans'kogo nacional'nogo universytetu sadivny'ctva. [Bulletin of Uman National University of Horticulture]*, 2, pp.75-79. (in Ukr.).
14. Adamenko, T.I., Kulbida, M.I. & Prokopenko, A.L. (eds). (2011). *Ahroklimatychnyi dovidnyk po terytorii Ukrainy [Agroclimatic reference book for territories of Ukraine]*. Kamianets-Podilsk. (in Ukr.).
15. Gao, Y. et al. (2013). The impact of emission and climate change on ozone in the United States under representative concentration pathways (RCPs). *Atmos. Chem. Phys.*, 13, pp. 607-621. <https://doi.org/10.5194/acp-13-9607-2013>.
16. Pol'ovyi A.M. (2007). *Modelyuvannya hidrometeorologichnoho rezhymu ta produktyvnosti ahroekosystem [Modeling of hydrometeorological regimes and agro-ecosystems' productivity]*. Kyiv: KNT (in Ukr.).

TENDENCY FOR CHANGE OF AGROCLIMATIC CONDITIONS FOR FORMATION OF MILLET YIELD BY 2050 WITHIN THE STEPPE ZONE OF UKRAINE

H. V. Lyashenko, N. V. Danilova, V. V. Kolosovska, A. V. Tolmachova

Odessa State Environmental University, 15, Lvivska St., 65016 Odesa, Ukraine,
lgv53@ukr.net, nataliadanilova0212@gmail.com,
kolosv@ukr.net, alla.tolmach@ukr.net

The current trend of climate change requires a significant revision of the species and breed composition of agricultural crops. Preference should be given to drought-resistant crops such as millet, especially in the Steppe zone of Ukraine. Thus studies of agro-climatic conditions for formation of millet yields in the coming years are of great importance. The article covers the assessment of changes in agro-climatic resources for the Northern and Southern Steppe zones of Ukraine according to RCP4.5 and RCP8.5 scenarios during three ten-year periods: 2021-2030, 2031-2040 and 2041-2050 as compared with the basic period of 1986-2005. The research applies the basic model for assessment of agro-climatic resources of formation of agricultural crops productivity developed by A. M. Polevoy. The model uses meteorological and agrometeorological data of air temperature and humidity, precipitation, solar radiation, water-physical properties and soil moisture obtained through standard meteorological and agrometeorological observations. The model of crops production process allowed establishing the agro-climatic resources during millet vegetation season and indicators of photosynthetic productivity, as well as determining the regularities for formation of different agri-environmental categories of crop yield and crop yield fluctuations under climate change within the thirty-year period from 2021 to 2050. The research evaluates the change of aforementioned indicators both in the context of individual periods and in the context of the Northern and Southern Steppe zones. It was found that the largest change in agro-climatic resources and millet productivity is observed in the Southern Steppe zone. For both the Southern and Northern Steppe zones the largest difference of such indicators is observed under the RCP8.5 climate change scenario. It was also found that the largest change of the indicators is observed within the period from 2031 to 2040. However, within the next decade, the values of all indicators will be close to the data observed during the basic period (1986-2005). According to the results of calculations for the period from 2021 to 2050 under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios the expected scenario yields will be higher than those of the basic period.

Key words: climate change; millet; agro-climatic resources; indicators of photosynthetic productivity; agri-environmental categories of crops; Steppe zone of Ukraine.

Подання до редакції : 06. 06. 2022

Надходження остаточної версії : 28. 06. 2022

Публікація статті : 07. 07. 2022