

В.А. ПЕПЕЛЯЄВ

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна,
e-mail: *pepelaev@yahoo.com*.

О.М. ГОЛОДНІКОВ

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна.

Н.О. ГОЛОДНІКОВА

Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, Київ, Україна.

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН НА ВРОЖАЙНІСТЬ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

Анотація. Розглянуто задачу моделювання впливу майбутнього клімату на врожайність сільськогосподарських культур (на прикладі ярої пшениці). Проаналізовано джерела кліматичних даних та значень агрометеорологічних індикаторів для минулих і майбутніх періодів. Розроблено математичну модель залежності медіани функції розподілу врожайності ярої пшениці від кліматичних змін з використанням агрокліматичних індикаторів. Проведено розрахунки за цією моделлю та проаналізовано отримані результати. Аналіз отриманих результатів свідчить про значне зростання рівня врожайності ярої пшениці у 2030–2040 рр. та підвищення ризику втрат її врожайності відносно історичних даних.

Ключові слова: кліматичні параметри, врожайність, квантильна регресія, реаналіз, агрометеорологічні індикатори, статистична вибірка.

ВСТУП

Продовольча безпека суттєво залежить від рівня врожайності сільськогосподарських культур [1, 2]. Врожайність сільськогосподарських культур залежить від погодних умов, обробітку ґрунту, сорту, попередників та інших чинників. Наприклад, для ярої пшениці, яка є культурою ранніх строків сівби, надзвичайно важливою є волога. Запізнення зі строками проведення сівби можуть призвести до суттєвого зниження врожайності цієї культури через значні втрати вологи [3].

Мінлива врожайність польових культур у різні за погодними умовами роки є надзвичайно складною проблемою, яку не вдається розв'язати впродовж останніх десятиріч [4, 5]. Одним із напрямів розв'язання цієї проблеми є моделювання впливу погодних умов на врожайність сільськогосподарських культур. Застосування цього математичного інструментарію сприятиме адаптації аграрного сектору до кліматичних змін.

До моделювання впливу майбутніх погодних умов на врожайність сільськогосподарських культур можна застосувати два підходи. Перший полягає у симуляції процесу розвитку рослини. Він враховує місцеві умови вирощування та використовувану технологію. Цей підхід дає змогу відстежувати зростання біомаси у змодельованому експериментальному навколишньому середовищі, оцінювати альтернативні технології вирощування сільськогосподарських культур і у такий спосіб сприяти адаптації до кліматичних змін [6]. Однак, для симуляції процесу росту рослин потрібно мати великий обсяг вхідної інформації, яка на практиці відсутня. Альтернативний підхід ґрунтується на методах статистичного моделювання. Він дає можливість встановити залежність історичної врожайності сільськогосподарської культури від кліматичних параметрів. Після визначення цієї залежності можна моделювати вплив майбутніх кліматичних змін на врожайність сільськогосподарських культур [7].

Для моделювання стохастичної залежності врожайності сільськогосподарської культури від кліматичних параметрів запропоновано використувати метод квантильної регресії, розроблений у роботі [8]. Він дає змогу визначати будь-який квантиль функції розподілу врожайності, а не тільки одне значення (середнє), як у випадку класичної лінійної регресії. За наявності інформації про квантилі можна оцінити параметри надійності та оптимізувати її [9–15]. Ця інформація потрібна для оцінювання ризику втрат урожаю в майбутньому, а також для мінімізації цього ризику шляхом вибору сільськогосподарських культур, які найбільш пристосовані до прогнозованих кліматичних змін.

1. ДЖЕРЕЛА КЛІМАТИЧНИХ ДАНИХ

Джерелом історичних кліматичних даних є метеорологічні спостереження. В Україні синоптики отримують основні метеорологічні дані лише на 187 наземних метеостанціях [16]. Через невисоку щільність їхнього розташування на території країни інформації, отриманої на цих метеостанціях, недостатньо для встановлення залежності історичної врожайності сільськогосподарських культур від кліматичних параметрів. Тому виникла потреба у використанні метеорологічної інформації з більш досконалих наборів даних E-OBS та реаналізу ERA5.

Набір E-OBS — це щоденний сітковий набір даних спостережень на материковій частині Європи. В його основу покладено часові ряди з мережі станцій проєкту Європейської оцінки клімату та набору даних (ECA&D) [17].

Реаналіз — це проєкт повторного аналізу метеорологічних умов. Його виконує Європейський центр середньострокових прогнозів погоди (ECMWF). У межах цього проєкту розробляють ансамблі прогнозів, кожний із яких є повним описом еволюції погоди. Ці ансамблі використовують для визначення найбільш імовірного сценарію майбутнього клімату [18, 19]. Крім того, у межах цього проєкту створено глобальні набори історичних даних, за допомогою яких відтворюють історію атмосфери, поверхні суші та океанів [20]. Результати цього проєкту використовують також для моніторингу зміни клімату. Остання версія реаналізу (ERA5) надає знімок атмосфери, поверхні землі та океану за кожну годину, починаючи з 1959 р. і до сьогодні. Для відтворення наземного компоненту клімату створено набір даних ERA5-Land [21] за програмою Copernicus.

2. ВХІДНІ ДАНІ

Для моделювання впливу кліматичних змін на врожайність сільськогосподарських культур використано дані про врожайність ярої пшениці у сільськогосподарських підприємствах Тернопільської області та історичні значення агрометеорологічних індикаторів у районах цієї області. Для формування достатньої статистичної вибірки зібрано інформацію про врожайність цієї культури за період 2008–2020 рр. по 17 районах цієї області відповідно до адміністративного поділу, який діяв до 2020 р. [22]. Цю інформацію отримано від Головного управління статистики у Тернопільській області.

Історичні значення агрометеорологічних індикаторів за цей період отримано із набору даних ERA5-Land [23, 24]. Зважаючи на те, що ці значення в суміжних районах Тернопільської області суттєво не відрізняються, всі 17 районів поділено на три зони. До першої зони включено райони, розташовані на півночі та північному сході цієї області, як-от: Збаразький, Кременецький, Лановецький, Підволочиський та Шумський. До другої зони включено центральні та західні райони цієї області, а саме Бережанський, Зборівський,

Козівський, Монастирський, Підгаєцький, Терехівський та Тернопільський. До третьої зони включено райони, розташовані на півдні Тернопільської області: Борщівський, Бучацький, Гусятинський, Заліщицький та Чортківський. Далі зазначені зони спрощено будемо називати «північна», «середня» та «південна» відповідно.

Для побудови залежності врожайності ярої пшениці від кліматичних умов у зонах використано історичні значення агрокліматичних індикаторів у трьох локаціях Тернопільської області з такими координатами: 49.25°N, 24.5°E (м. Бережани), 50°N, 26°E (м. Шумськ) та 48.50°N, 26°E (м. Борщів). Розглянуто такі типи індикаторів (у дужках наведено їхні позначення):

1. Середня сезонна температура зимового (t_1), весняного (t_2), літнього (t_3) та осіннього (t_4) періодів.
2. Середня місячна температура квітня (h_4), травня (h_5), червня (h_6), липня (h_7) та серпня (h_8).
3. Кількість днів з температурою повітря вище 30°C для таких періодів: 15 березня — 1 вересня (H_{32}); 1 квітня — 1 вересня (H_{41}); 15 квітня — 1 вересня (H_{42}); 1 травня — 1 вересня (H_{51}); 15 травня — 1 вересня (H_{52}); 1 червня — 1 вересня (H_{61}); 15 червня — 1 вересня (H_{62}); 1 липня — 1 вересня (H_{71}); 15 липня — 1 вересня (H_{72}); 1 серпня — 1 вересня (H_{80}), де перший індекс позначає номер місяця, а другий позначає першу половину місяця (1), другу половину місяця (2), або весь місяць (0).
4. Кількість днів з температурою повітря вище 25°C у травні (u_1), червні (u_2), липні (u_3) та серпні (u_4).
5. Сезонні значення кількості опадів зимового (g_1), весняного (g_2), літнього (g_3) та осіннього (g_4) періодів.
6. Кількість опадів у березні (d_3), квітні (d_4), травні (d_5), червні (d_6), липні (d_7) та серпні (d_8).
7. Дата останнього весняного заморозку (f).

На відміну від історичного періоду 2008–2020 рр., значення агрометеорологічних індикаторів для майбутнього періоду 2030–2040 рр. можна визначити лише за результатами ансамблевого моделювання клімату, яке є основним інструментом, доступним для відтворення реакції кліматичної системи на викиди парникових газів у майбутньому. Отриманий у такий спосіб ансамбль результатів моделювання розглядають як імовірнісний розподіл станів кліматичної системи в майбутньому.

Для побудови моделі залежності врожайності сільськогосподарської культури від кліматичних параметрів використано значення медіан функцій розподілу агрометеорологічних індикаторів (далі для спрощення — агрометеорологічних індикаторів) у локаціях м. Бережани, м. Шумськ та м. Борщів для кожного року майбутнього періоду 2030–2040 рр. із набору даних ERA5-Land [23, 24]. Ці значення згенеровано за результатами ансамблевого моделювання клімату для викидів парникових газів за сценарієм RCP4.5 з просторовою роздільною здатністю сітки 0.5° x 0.5°. У табл. 1 наведено перелік агрометеорологічних індикаторів та їхні значення для 2030 р. у локації 49.25°N, 24.5°E (м. Бережани) за сценарієм RCP4.5.

Таблиця 1. Значення агрокліматичних індикаторів для 2030 р. у локації 49.25°N, 24.5°E (м. Бережани) за сценарієм викидів парникових газів RCP4.5 [24]

Індикатор	Значення	Індикатор	Значення	Індикатор	Значення
t_1	0.8	h_4	9.4	H_{41}	8
t_2	9.7	h_5	14.5	H_{42}	8
t_3	19.4	h_6	18.9	H_{51}	8
t_4	9.9	h_7	20	H_{52}	8
g_1	147.6	h_8	19.2	H_{61}	8
g_2	210.8	d_3	43.3	H_{62}	8
g_3	259	d_4	66.5	H_{71}	6
g_4	138.2	d_5	101	H_{72}	5
u_1	3	d_6	65.9	H_{80}	1
u_2	14	d_7	104.3	f	87
u_3	14	d_8	88.7		
u_4	16	H_{32}	8		

3. МОДЕЛЬ ЗАЛЕЖНОСТІ ВРОЖАЙНОСТІ ЯРОЇ ПШЕНИЦІ ВІД КЛІМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Моделювання стохастичного впливу кліматичних параметрів на врожайність сільськогосподарської культури полягає у побудові залежності квантилів її функції розподілу від агрокліматичних індикаторів, визначених у розд. 2. Нехай Y — випадкова величина, яка моделює врожайність деякої сільськогосподарської культури, $F_Y(y) = P(Y \leq y)$ — її функція розподілу, γ — фіксоване число, $0 \leq \gamma \leq 1$. Нехай $Y_1, \dots, Y_n$ — значення врожайності сільськогосподарської культури в декількох районах за декілька років, які можна розглядати як випадкову вибірку із функції розподілу $F_Y(y)$. Визначимо γ -квантильну функцію:

$$Q_Y(\gamma) = F_Y^{-1}(\gamma) = \inf\{y | F_Y(y) \geq \gamma\}.$$

Будемо вважати, що врожайність лінійно залежить від K незалежних змінних $\vec{x}' = [1, x_1, \dots, x_K]$:

$$Y = \vec{x}' \vec{\beta} + \varepsilon, \quad (1)$$

де $\vec{\beta}' = [\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_K]$ — вектор коефіцієнтів лінійної функції; ε — випадкова похибка, математичне сподівання якої дорівнює нулю. Тоді γ -квантильну функцію регресії можна записати у такому вигляді:

$$Q_Y(\gamma | \vec{x}) = \inf\{y | F_Y(y | \vec{x}) \geq \gamma\} \equiv \vec{x}' \vec{\beta}_\gamma,$$

де $\vec{x}' = (1, x_1, \dots, x_K)$ — вектор незалежних змінних (значень агрокліматичних індикаторів), $\vec{\beta}_\gamma = (\beta_0^\gamma, \beta_1^\gamma, \dots, \beta_K^\gamma)$ — вектор коефіцієнтів γ -квантильної функції регресії (1), які можна знайти шляхом мінімізації нормалізованої похибки Коенкера–Бассета [8]:

$$\sum_{i: Y_i \geq \vec{x}_i' \vec{\beta}_\gamma} \gamma |Y_i - \vec{x}_i' \vec{\beta}_\gamma| + (1 - \gamma) \sum_{i: Y_i < \vec{x}_i' \vec{\beta}_\gamma} |Y_i - \vec{x}_i' \vec{\beta}_\gamma|. \quad (2)$$

Таблиця 2. Значення коефіцієнтів регресії в моделі (3)

Коефіцієнти	Значення	Коефіцієнти	Значення	Коефіцієнти	Значення
a_0	-207.4	n_4	-6.73	a_{32}	-0.31
a_1	6.53	n_5	2.46	a_{41}	-0.31
a_2	13.18	n_6	22.83	a_{42}	-0.31
a_3	-63.11	n_7	22.53	a_{51}	-0.31
b_1	0.24	n_8	23.02	a_{52}	-0.31
b_2	11.19	m_3	-11.14	a_{61}	-0.31
b_3	22.73	m_4	-11.08	a_{62}	3.07
c_1	1.10	m_5	-11.29	a_{71}	-2.45
c_2	0.99	m_6	-22.67	a_{72}	-2.18
c_3	-0.37	m_7	-22.7	a_{80}	4.58
c_4	-1.13	m_8	-22.68	k	0.30

Для моделювання залежності медіани ($\gamma = 0.5$) функції розподілу врожайності ярої пшениці від агрокліматичних індикаторів використано таку лінійну функцію регресії:

$$Q_Y = a_0 + \sum_{i=1}^3 (a_i t_i + b_i g_i) + \sum_{i=1}^4 c_i u_i + \sum_{i=4}^8 (n_i h_i) + \sum_{i=3}^8 (m_i d_i) + (a_{32} H_{32} + \sum_{i=4}^7 \sum_{j=1}^2 a_{ij} H_{ij} + a_{80} H_{80}) + kf. \quad (3)$$

Значення коефіцієнтів цієї функції визначено шляхом мінімізації нормалізованої похибки Коенкера–Бассета (2) для $\gamma = 0.5$ з використанням пакета програм PSG, розробленого компанією American Optimal Decisions [25].

Отримані результати наведено в табл. 2.

Підставимо результати, наведені в табл. 1 і 2, у формулу (3). Отримаємо значення проєкції медіани функції розподілу врожайності ярої пшениці $Q_Y(0.5)$ у 2030 р. в локації 49.25°N, 24.5°E (м. Бережани) за сценарієм RCP4.5. Зважаючи на те, що значення агрометеорологічних індикаторів у районах другої зони, в яку включено і м. Бережани, суттєво не відрізняються, можна вважати, що отриманий результат є однаковим для всіх районів цієї зони.

Під час побудови квантильної регресії як аналог коефіцієнта детермінації R^2 використано коефіцієнт множинної детермінації R^1 , запропонований у [8]. У результаті визначення коефіцієнтів моделі (3) отримано значення $R^1 = 0.466$. Отже, вибрані агрометеорологічні індикатори з набору даних ERA5-Land, використані в моделі (3), пояснюють лише 46.6% мінливості медіани функції розподілу врожайності ярої пшениці. Слід зауважити, що в запропонованій моделі не враховано вплив технологій вирощування та сортів ярої пшениці на врожайність. Тому можна стверджувати, що модель (3) досить добре відтворює залежність урожайності сільськогосподарських культур від кліматичних параметрів.

4. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ

4.1. Історичні показники врожайності ярої пшениці. Історичні показники врожайності ярої пшениці в окремій зоні за окремий рік можна розглядати як реалізації випадкової величини, яка характеризується деякою функцією розподілу. За цією функцією розподілу визначено значення медіан функцій розподілу врожайності ярої пшениці в кожній зоні за кожний рік періоду 2008–2020 рр. Їх наведено у табл. 3.

Таблиця 3. Значення медіан функцій розподілу історичних показників врожайності ярої пшениці (ц/га) в кожній зоні за період 2008–2020 рр.

Зони	Роки історичного періоду												
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Північна	21.3	21.1	20.3	31.2	28.9	30.8	35.5	33.5	33.6	43.3	49.2	56.9	45.9
Середня	26.1	23.5	15.7	25.7	29.2	25.8	41.3	35.8	50.3	46.4	48.6	49.8	47.4
Південна	29.2	25.7	19.3	28.9	29.0	24.5	33.5	41.9	35.1	52.7	36.6	39.8	38.8

Таблиця 4. Значення медіан функцій розподілу проєкцій урожайності ярої пшениці (ц/га) за сценарієм зміни клімату RCP4.5 в окремих зонах у майбутньому періоді 2030–2040 рр.

Зони	Роки майбутнього періоду										
	2030	2031	2032	2033	2034	2035	2036	2037	2038	2039	2040
Північна	58.9	41.5	22.0	46.5	19.8	38.4	48.1	57.5	51.1	76.9	46.7
Середня	52.2	45.7	30.9	57.1	16.0	56.2	55.3	55.6	61.4	70.7	54.1
Південна	63.2	52.7	16.9	55.0	33.6	48.3	43.0	56.9	57.6	68.6	58.8

Таблиця 5. Середні, мінімальні та максимальні значення медіан функцій розподілу історичних (2008–2020 рр.) показників та проєкцій урожайності ярої пшениці (ц/га) за сценарієм зміни клімату RCP4.5 в окремих зонах у майбутньому періоді 2030–2040 рр.

Зони	Історична врожайність (2008–2020 рр.), ц/га			Проекція врожайності (2030–2040 рр.), ц/га		
	Середня	Мінімальна	Максимальна	Середня	Мінімальна	Максимальна
Північна	34.7	20.3	56.9	46.1	19.8	76.9
Середня	35.8	15.7	50.3	50.5	16	70.7
Південна	33.5	19.3	52.7	50.4	16.9	68.6

4.2. Медіани функцій розподілу проєкцій врожайності ярої пшениці в майбутньому періоді. Підставивши значення з табл. 1 та 2 у формулу (3), знаходимо медіани функції розподілу проєкцій урожайності ярої пшениці за сценарієм зміни клімату RCP4.5 у середній зоні у 2030 р. Аналогічно розраховано значення цього показника у північній та південній зонах для кожного року майбутнього періоду 2030–2040 рр., які наведено в табл. 4.

З використанням даних, наведених у табл. 3 і 4, визначено середні, мінімальні та максимальні значення цих показників за минулий (2008–2020 рр.) та майбутній (2030–2040 рр.) періоди. Їх наведено в табл. 5.

Із результатів, наведених у табл. 5, випливає, що у тому разі, коли зміна клімату відбуватиметься за сценарієм RCP4.5, середні та максимальні значення медіан функцій розподілу проєкцій урожайності ярої пшениці в Тернопільській області у 2030–2040 рр. значно зростуть відносно історичного періоду. Водночас їхні мінімальні значення суттєво не зміняться.

ВИСНОВКИ

Важливою складовою адаптації рослинництва до кліматичних змін є оцінювання впливу майбутніх кліматичних умов на врожайність сільськогосподарських культур. Єдиним джерелом інформації про майбутній клімат є результати моделювання кліматичних змін з використанням ансамблевого підходу. Суть цього підходу полягає у здійсненні паралельних розрахунків з використанням різних комбінацій

кліматичних моделей за однакового зовнішнього впливу [26]. Ці ансамблі використовують для визначення найбільш імовірного сценарію майбутнього клімату. У межах проекту повторного аналізу метеорологічних умов, який виконує Європейський центр середньострокових прогнозів погоди (ECMWF), розроблено ансамблі прогнозів, кожний із яких є повним описом еволюції погоди. Ці ансамблі використовують для визначення найбільш імовірного сценарію майбутнього клімату.

У цій роботі здійснено моделювання впливу майбутніх погодних умов на врожайність сільськогосподарських культур методом квантильної регресії. Для побудови моделі використано дані про врожайність ярої пшениці у сільськогосподарських підприємствах Тернопільської області за 2008–2020 рр. та історичні значення агрометеорологічних індикаторів у районах цієї області за цей період із набору даних ERA5-Land [23, 24], створеного за програмою Copernicus.

За допомогою побудованої лінійної функції регресії та значень агрометеорологічних індикаторів із набору даних ERA5-Land визначено середні, мінімальні та максимальні значення медіан функцій розподілу проєкцій урожайності ярої пшениці за сценарієм зміни клімату RCP4.5 в окремих групах районів у майбутньому періоді 2030–2420 рр.

З аналізу отриманих результатів випливає, що тоді, коли зміна клімату відбуватиметься за сценарієм RCP4.5, середні та максимальні значення медіан функцій розподілу проєкцій урожайності ярої пшениці в Тернопільській області на 2030–2040 рр. суттєво зростуть відносно історичного періоду. Водночас їхні мінімальні значення суттєво не зміняться.

Автори статті висловлюють подяку програмі Copernicus за забезпечення доступу до необхідних для дослідження даних.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Golodnikov A.N., Ermol'ev Yu.M., Ermol'eva T.Y., Knopov P.S., Pepelyaev V.A. Integrated modeling of food security management in Ukraine. I. Model for management of the economic availability of food. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2013. Vol. 49, N 1. P. 26–35. <https://doi.org/10.1007/s10559-013-9481-8>.
2. Golodnikov A.N., Ermol'ev Yu.M., Ermol'eva T.Y., Knopov P.S., Pepelyaev V.A. Integrated modeling of food security management in Ukraine. II. Models for structural optimization of agricultural production under risk. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2013. Vol.49, N 2. P. 217–228. <https://doi.org/10.1007/s10559-013-9503-6>.
3. Нінуа О. Вибір протруйників та підготовка до сівби ярої пшениці. *Агроексперт*. 2017. № 2. URL: <https://agroexpert.ua/vybir-prottrujnykiv-ta-pidhotovka-do-sivby-iaroi-pshenytsi/>.
4. Мостіпан М.І. Врожайність та якість зерна пшениці озимої залежно від часу відновлення весняної вегетації в північному степу України. *Матеріали конференції «Досягнення та перспективи галузі виробництва, переробки і зберігання сільськогосподарської продукції»* (9–11 квітня 2020, Кропивницький, Україна). Кропивницький, 2020. С. 57–59. URL: <http://www.tsatu.edu.ua/ophv/wp-content/uploads/sites/13/zbirnyk-materialiv-vseukrayinskoyi-konferenciyi-dosjahnennja-i-perspektyvy...-2020.pdf#page=60>.
5. Мостіпан М.І., Умрихін Н.Л. Врожайність пшениці озимої залежно від погодних умов у ранньовесняний період в умовах північного Степу України. *Вісник Полтавської державної аграрної академії*. 2018. №4. С.62–69. URL: <http://journals.pdaa.edu.ua/visnyk/article/view/1062>.
6. Lobell D.B., Cassman K.G., Field C.B. Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 2009. Vol. 34. P. 179–204. <https://doi.org/10.1146/annurev.envIRON.041008.093740>.
7. Мюллер Д., Юнгандreas А., Кох Ф, Шірхорн Ф. Вплив кліматичних змін на виробництво пшениці в Україні. Київ, 2016. 45 с. URL: https://apd-ukraine.de/images/APD_APR_05-2016_impact_on_wheat_ukr_fin.pdf.
8. Koenker R., Bassett G. Regression quantiles. *Econometrica*. 1978. Vol. 46, N 1. P. 33–50. <https://doi.org/10.2307/1913643>.

9. Golodnikov A.N., Knopov P.S., Pepelyaev V.A. Estimation of reliability parameters under incomplete primary information. *Theory and Decision*. 2004. Vol. 57, Iss. 4. P. 331–344. <https://doi.org/10.1007/s11238-005-3217-9>.
10. Golodnikov A.N., Ermoliev Yu.M., Knopov P.S. Estimating reliability parameters under insufficient information. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2010. Vol. 46, N 3. P. 443–459. <https://doi.org/10.1007/s10559-010-9219-9>.
11. Butenko S., Golodnikov A., Uryasev S. Optimal security liquidation algorithms. *Computational Optimization and Applications*. 2005. Vol. 32, Iss. 1–2. P. 9–27. <https://doi.org/10.1007/s10589-005-2052-9>.
12. Pepelyaev V.A., Golodnikova N.A. Mathematical methods for crop losses risk evaluation and account for sown areas planning. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2014. Vol. 50, N 1. P. 60–67. <https://doi.org/10.1007/s10559-014-9592-x>.
13. Pepelyaev V.A., Golodnikov A.N., Golodnikova N.A. Reliability optimization method alternative to bPOE. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2022. Vol. 58, N 4. P. 593–597. <https://doi.org/10.1007/s10559-022-00492-9>.
14. Pepelyaev V.A., Golodnikov A.N., Golodnikova N.A. A new method of reliability optimization in the classical problem statement. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2022. Vol. 58, N 6. P. 917–922. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00525-x>.
15. Pepelyaev V.A., Golodnikov A.N., Golodnikova N.A. Reliability optimization in plant production. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2022. Vol. 58, N 2. P. 191–196. <https://doi.org/10.1007/s10559-022-00450-5>.
16. Метеорологічна станція. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Метеорологічна_станція.
17. E-OBS daily gridded meteorological data for Europe from 1950 to present derived from in-situ observations. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)*. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/insitu-gridded-observations-europe?tab=overview>.
18. Forecast charts and data. ECMWF. URL: <https://www.ecmwf.int/en/forecasts>.
19. Data assimilation. ECMWF. URL: <https://www.ecmwf.int/en/research/data-assimilation>.
20. Climate reanalysis. ECMWF. URL: <https://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis>.
21. ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present. ECMWF. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land-monthly-means?tab=overview>.
22. Адміністративний устрій Тернопільської області. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Адміністративний_ustriy_Ternopils_koj_oblasti#Радянський_період.
23. Nobakht M., Beavis P., O'Hara S., Hutjes R., Supit I. Agroclimatic indicators. Product user guide and specification. ECMWF Copernicus Report, 2019. 27 p. URL: https://myololobuckert213913653.s3.amazonaws.com/documentation/global-agroclimatic-indicators-from-1951-to-2099-jamstec-japan/Agroclimatic_ProductUserGuideSpecification_v2.0.pdf?
24. Agrometeorological indicators from 1979 to present derived from reanalysis. 2020. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.6c68c9bb?tab=overview/>.
25. Portfolio Safeguard. URL: <http://www.aorda.com/index.php/portfolio-safeguard/>.
26. Pepelyaev V.A., Golodnikov A.N., Golodnikova N.A. Reviewing climate changes modeling methods. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2023. Vol. 59, N 3. P. 398–406. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00574-2>.

V.A. Pepelyaev, A.N. Golodnikov, N.A. Golodnikova

SIMULATING THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE YIELD OF AGRICULTURAL CROPS

Abstract. The problem of modeling the impact of the future climate on the yield of agricultural crops (on the example of spring wheat) is considered. The sources of climatic data and values of agrometeorological indicators for past and future periods were analyzed. A mathematical model of the dependence of the median of the spring wheat yield distribution function on climatic changes was developed using agroclimatic parameters. The calculations were carried out according to this model, and the obtained results were analyzed. The analysis of the results indicates a significant increase in the yield level of spring wheat in 2030–2040 and an increase in the risk of losses of its yield in relation to historical data.

Keywords: climatic parameters, crop capacity, quantile regression, reanalysis, agrometeorological indicators, statistical sampling.

Надійшла до редакції 02.03.2023