

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.

МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ СТРУКТУРИ ПОСІВНИХ ПЛОЩ ДЛЯ АДАПТАЦІЇ РОСЛИННИЦТВА ДО КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН¹

Анотація. Розглянуто проблему адаптації рослинництва до кліматичних змін. Досліджено задачу пошуку оптимальної структури посівної площі в майбутньому з урахуванням можливого сценарію зміни клімату. Її суть полягає в пошуку такого розподілу посівної площі під різні групи сільськогосподарських культур, за якого максимізується середньорічна врожайність за умови обмеження на ризик недобору врожаю внаслідок реалізації несприятливого сценарію погодних умов. Для розв'язання цієї задачі розроблено математичну модель, за якою проведено розрахунки.

Ключові слова: адаптація до кліматичних змін, рослинництво, структура посівної площі, ризик, оптимізація, врожайність.

ВСТУП

Понад одну третину поточної мінливості врожайності сільськогосподарських культур можна пояснити коливаннями погодних умов [1]. За даними продовольчої та сільськогосподарської організації ООН (FAO) кількість кліматичних явищ, несприятливих для вирощування сільськогосподарських культур, на всіх континентах з початку 90-х років минулого століття зростає вдвічі [2, 3]. У результаті збитки і втрати в рослинництві та тваринництві у 2006–2016 рр. тільки внаслідок посухи в середньому становили понад 80 % від загальних обсягів відповідних показників у сільському господарстві в цілому. В рослинництві частка цих збитків сягнула майже 50 %, а у тваринництві — понад 35 %. У [4] продемонстровано, що майбутні глобальні ціни на сільськогосподарську продукцію будуть дуже чутливими до ступеня впливу зміни клімату на врожайність. Зростання цін на продукти харчування негативно позначиться на стані продовольчої безпеки в Україні [5–7]. Тому проблема адаптації аграрного сектору України до кліматичних змін набула особливої актуальності.

Одним із напрямків розв'язання цієї комплексної проблеми є пошук оптимального розподілу посівної площі між різними групами сільськогосподарських культур у майбутньому, який забезпечує максимум середньорічної врожайності за наявності обмеження на ризик недобору врожаю внаслідок реалізації несприятливих погодних умов [8, 9]. Для цього потрібно насамперед здійснити моделювання впливу майбутнього клімату на врожайність різних сільськогосподарських культур. Після цього слід скористатися побудованою моделлю врожайності для розв'язання задачі пошуку оптимального розподілу посівної площі між сільськогосподарськими культурами. Ефективним інструментарієм для реалізації цього підходу є математичні методи оцінювання ризику втрат та оптимізації надійності, розроблені в [10–19].

¹ Роботу частково виконано в межах наукового проекту РК № 0122U000552 «Комплексний аналіз робастних профілактичних та адаптивних заходів управління продовольством, енергією, водою та соціальною сферою в умовах системних ризиків та наслідків COVID-19».

Для моделювання впливу майбутніх кліматичних змін на врожайність сільськогосподарських культур у [19] запропоновано підхід, відповідно до якого спочатку будують модель залежності врожайності від агрокліматичних індикаторів з використанням історичних даних, а потім за допомогою побудованої моделі визначають показники врожайності в майбутньому періоді з урахуванням одного з можливих сценаріїв кліматичних змін.

Для побудови такої моделі у [19] використано історичні дані щодо значень агрометеорологічних індикаторів для Тернопільської області з набору даних наземного компонента реаналізу клімату ERA5-Land [20, 22] та врожайності ярої пшениці за період 2008–2020 рр. у 17 районах цієї області. Всі зазначені райони поділено на три зони. До першої зони включено райони, розташовані на півночі та північному сході Тернопільської області, до другої — її центральні та західні райони, до третьої — райони, розташовані на півдні. Далі ці зони для спрощення посилення на них відповідно називатимемо «північна», «середня» та «південна».

З використанням побудованої моделі залежності врожайності від агрокліматичних індикаторів та майбутніх значень цих індикаторів визначено медіани функції розподілу проєкцій врожайності сільськогосподарської культури в кожній зоні за сценарієм зміни клімату RCP4.5 у майбутньому періоді 2030–2040 рр.

Наступним кроком в адаптації рослинництва до кліматичних змін буде розроблення методів оптимізації структури посівних площ з урахуванням можливих сценаріїв зміни клімату. Розв’язанню зазначеної проблеми присвячена ця стаття, в якій розглянуто задачу оптимізації структури посівних площ у майбутньому періоді 2030–2040 рр.

1. РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ ВРОЖАЙНОСТІ

Для спрощення викладу розглянемо групу зернових, яка складається тільки з двох культур: ярої пшениці та ярого ячменю. Для визначення харчової цінності цих культур скористаємося підходом FAO, відповідно до якого цей

Таблиця 1. Значення медіан функцій розподілу проєкцій врожайності ярої пшениці та ярого ячменю за сценарієм зміни клімату RCP4.5 у трьох зонах Тернопільської області у майбутньому періоді 2030–2040 рр.

Роки	Значення медіан функцій розподілу проєкцій врожайності ярої пшениці та ярого ячменю за сценарієм зміни клімату RCP4.5 у майбутньому періоді 2030–2040 рр. (ц/га)					
	Північна зона		Середня зона		Південна зона	
	Яра пшениця	Ярий ячмінь	Яра пшениця	Ярий ячмінь	Яра пшениця	Ярий ячмінь
2030	58.9	85.9	52.2	74.7	63.2	50.6
2031	41.5	78.2	45.7	63.2	52.7	53.0
2032	22.0	38.1	30.9	44.4	16.9	45.1
2033	46.5	70.4	57.1	47.2	55.0	46.9
2034	19.8	61.9	16.0	57.5	33.6	54.8
2035	38.4	46.8	56.2	50.9	48.3	55.7
2036	48.1	35.5	55.3	50.2	43.0	44.0
2037	57.5	33.1	55.6	43.3	56.9	12.8
2038	51.1	80.1	61.4	87.9	57.6	78.6
2039	76.9	65.5	70.7	70.3	68.6	48.8
2040	46.7	42.2	54.1	74.9	58.8	37.0

показник визначають за енергетичною цінністю, кількістю білків і жирів. У цій роботі оцінено харчову цінність за кількістю білків.

За допомогою підходу до моделювання впливу майбутніх кліматичних змін на врожайність сільськогосподарських культур, запропонованого у [19], визначено медіани функцій розподілу проєкцій врожайності ярої пшениці та ярого ячменю у трьох зонах Тернопільської області за сценарієм зміни клімату RCP4.5 для кожного року майбутнього періоду 2030–2040 рр. Значення цих показників наведено в табл. 1.

Далі медіану функції розподілу проєкції врожайності спрощено називатимемо «врожайність».

2. ФОРМУЛЮВАННЯ ЗАДАЧІ ОПТИМІЗАЦІЇ СТРУКТУРИ ПОСІВНИХ ПЛОЩ

У загальному вигляді математичну постановку задачі оптимізації структури посівних площ формують так.

Нехай I — кількість видів зернових культур; ξ_i — випадкова величина, яка моделює врожайність i -ї культури на майбутній період за сценарієм зміни клімату RCP4.5, $i = 1, \dots, I$ [19]; $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_I)$ — випадковий вектор; x_i — частка посівної площі, яка відведена під i -у зернову культуру; $x = (x_1, x_2, \dots, x_I)$ — вектор, який позначає структуру посівних площ. Випадкову величину $\eta(x, \xi)$ — середньозважену врожайність (далі врожайність) групи зернових культур, запланованих до посіву, визначають за формулою

$$\eta(x, \xi) = \sum_{i=1}^I x_i \xi_i. \quad (1)$$

Для фіксованої структури посівних площ x функція

$$\omega(x, \xi) = E[\eta(x, \xi)] - \eta(x, \xi) \quad (2)$$

є випадковим відхиленням врожайності зернових культур $\eta(x, \xi)$ від математичного сподівання цього показника, $E[\eta(x, \xi)]$, яке будемо трактувати як втрату врожайності. Додатні значення випадкової величини $\omega(x, \xi)$ відповідають небажаним результатам (недобір врожаю відносно середнього рівня), а від'ємні — сприятливим (перевищення середнього рівня врожайності). Для оцінки ризику відхилення (2) будемо використовувати міру ризику CVaR-deviation ($CVaR_Dev_\alpha$) з квантилем α [23].

Задача оптимізації структури посівних площ полягає у пошуку такого розподілу загальної посівної площі між зерновими культурами x , який забезпечує максимум середньої врожайності

$$\max_x E[\eta(x, \xi)] \quad (3)$$

за обмежень:

— на ризик відхилення середньозваженої врожайності від математичного сподівання цього показника

$$CVaR_Dev_\alpha(\eta(x, \xi)) \leq w; \quad (4)$$

— на змінні x_i , $i = 1, \dots, I$,

$$\sum_{i=1}^I x_i = 1, \quad (5)$$

$$x_i \geq 0, \quad (6)$$

де w — максимально допустиме відхилення.

Оптимізаційну задачу (3)–(6) розв'язано з використанням пакета програм PSG, розробленого компанією American Optimal Decisions [24].

3. ХАРЧОВА ЦІННІСТЬ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

Під час оптимізації структури посівних площ будемо оцінювати харчову цінність цих культур за кількістю білків на 1 га посівної площі (кг/га). Отже, вважатимемо, що в моделі (1)–(6) ξ_i — це випадкова величина, яка моделює медіану функції розподілу кількості білків на 1 га посівної площі (кг/га) i -ї культури. Далі для спрощення викладу медіану функції розподілу кількості білків називатимемо «кількість білків». В Україні культивують м'які і тверді сорти ярої пшениці. М'які сорти містять 13.9 % білків, а тверді сорти — 16.0 %; ячмінь містить 12.2 % білків [25]. У цій роботі йдеться про м'який сорт ярої пшениці.

На основі цієї інформації про хімічний склад зерна та значень врожайності ярої пшениці та ярого ячменю, наведених у табл. 1, визначено оцінки кількості (кг) білків, очікуваної до отримання з 1 га площ посівів цих культур у майбутньому періоді 2030–2040 рр., які представлено в табл. 2.

Таблиця 2. Кількість білків, очікувана до отримання з 1 га площі посівів під ярою пшеницею та ярим ячменем у трьох зонах Тернопільської області у майбутньому періоді 2030–2040 рр. у разі реалізації сценарію зміни клімату RCP4.5

Роки	Кількість білків, очікувана до отримання з 1 га площі посівів під ярою пшеницею та ярим ячменем у майбутньому періоді 2030–2040 рр. (кг)					
	Північна зона		Середня зона		Південна зона	
	Яра пшениця	Ярий ячмінь	Яра пшениця	Ярий ячмінь	Яра пшениця	Ярий ячмінь
2030	818.7	1048.0	725.6	911.2	878.5	617.3
2031	576.9	954.0	635.2	771.2	732.5	646.6
2032	305.8	464.8	429.5	541.3	234.9	550.2
2033	646.4	858.9	793.7	575.2	764.5	572.2
2034	275.2	755.2	222.4	701.6	467.0	668.6
2035	533.8	571.0	781.2	620.7	671.4	679.5
2036	668.6	433.1	768.7	612.8	597.7	536.8
2037	799.3	403.8	772.8	527.7	790.9	156.2
2038	710.3	977.2	853.5	1072.3	800.6	958.9
2039	1068.9	799.1	982.7	857.7	953.5	595.4
2040	649.1	514.8	752.0	913.8	817.3	451.4

4. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ

Дані щодо кожної зони у табл. 2 об'єднано у два набори. Перший набір містить інформацію щодо ярої пшениці, а другий — щодо ярого ячменю. Отже, розмірність оптимізаційної задачі (3)–(6) зростає з 11 до 31. Розглянуто три варіанти цієї задачі з використанням трьох значень квантиля: $\alpha = 0.7, 0.8, 0.9$. Отримані результати оптимізації для $\alpha = 0.9$ наведено в табл. 3.

Із результатів, наведених у табл. 3, випливає, що для значення квантиля $\alpha = 0.9$ збільшення частки ячменю у структурі посівів супроводжується зниженням показників білку в урожаї, отриманому з посівної площі, але при цьому зменшується ризик втрат врожаю. Розрахунки показують, що ця тенденція зберігається і для $\alpha = 0.7, 0.8$ (рис. 1).

Результати, отримані для $\alpha = 0.7, 0.8, 0.9$, наведено на рис. 1.

На рис. 1 наведено три криві, які відображають залежність між кількістю білків та значеннями ризику для квантилів $\alpha = 0.7, 0.8, 0.9$. Кожна із цих кривих є аналогом границі Марковіца, яка забезпечує максимальну дохідність для певного рівня ризику. У теорії портфельної оптимізації границя Марковіца (або

Таблиця 3. Значення кількості білків та відповідного ризику втрат врожаю ($CVaR_Dev_{\alpha}$, $\alpha = 0.9$), які можна отримати з 1 га площі посівів для різних варіантів структури посівної площі, відведеної під ярий ячмінь та яру пшеницю, в Тернопільській області у майбутньому періоді 2030–2040 рр. у разі реалізації сценарію зміни клімату RCP4.5

Структура посівів, частки		Кількість білків, кг/га	Ризик, $CVaR_Dev_{0.9}(\eta(x, \xi))$
Яра пшениця	Ярий ячмінь		
0.50	0.50	678.75	260.00
0.55	0.45	679.01	275.00
0.60	0.40	679.24	290.00
0.64	0.36	679.45	305.00
0.69	0.31	679.67	320.00
0.73	0.27	679.89	335.00
0.78	0.22	680.10	350.00
0.82	0.18	680.32	365.00
0.87	0.13	680.54	380.00
0.91	0.09	680.75	395.00
0.95	0.05	680.93	410.00
1.00	0.00	681.17	430.00

межа ефективності) є набором оптимальних портфелів цінних паперів, для якого забезпечується максимальний дохід за визначеного рівня ризику [26]. У нашому випадку аналогом портфелю цінних паперів є структура посівних площ, а аналогом доходу — сумарна кількість білків, отримана з 1 га посівної площі.

Розглянемо границю Марковіца (межу ефективності), побудовану для квантиля $\alpha = 0.9$. На рис. 1 зображено дві структури посівних площ (А і В) з однаковим рівнем ризику $CVaR_Dev_{0.9} = 360$. Структура А, яка знаходиться нижче межі ефективності, є неоптимальною, оскільки вона не забезпечує достатньої кількості білків, отриманої з 1 га посівної площі. Водночас структура В, яка знаходиться на межі ефективності, забезпечує максимально можливу для ризику $CVaR_Dev_{0.9} = 360$ кількість білків (680.25 кг/га). Отже, структура В є оптимальною.

Неоптимальними також є всі структури посівних площ, які знаходяться праворуч від межі ефективності, оскільки вони мають вищий рівень ризику для

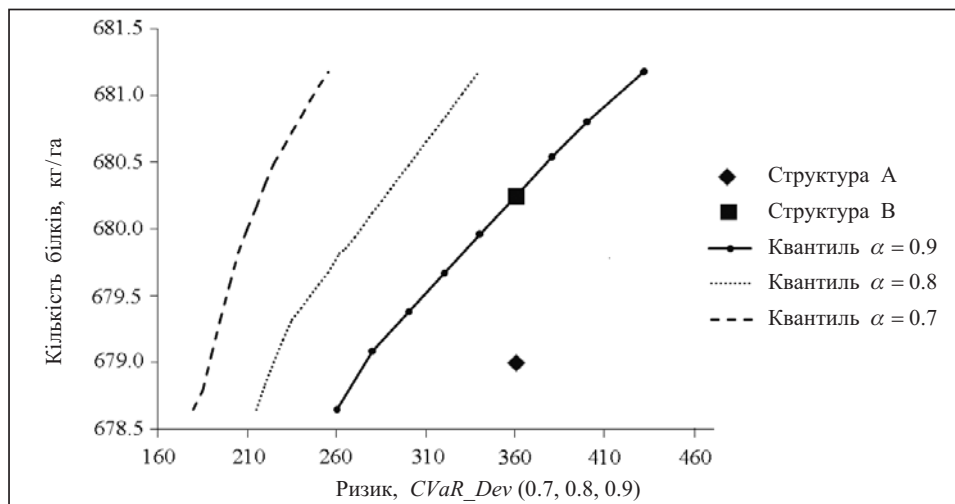


Рис. 1. Залежність кількості білків від значення ризику для квантилів $\alpha = 0.7, 0.8, 0.9$

заданої кількості білків. Межа ефективності включає структури посівних площ, які забезпечують найвищу кількість білків за певного рівня ризику.

Межа ефективності, побудована для квантиля $\alpha = 0.8$, має краще співвідношення ризик/дохідність, ніж для квантиля $\alpha = 0.9$, а межа ефективності для квантиля $\alpha = 0.7$ має кращі властивості, ніж дві інші.

ВИСНОВКИ

Внаслідок глобального потепління значна частина посівних площ сільсько-господарських культур в Україні знаходиться у зоні ризикованого землеробства. З підвищенням глобальної температури ця ситуація ставатиме дедалі більш критичною. Через це потрібно розробити нові підходи до адаптації рослинництва до кліматичних змін. Одним із таких підходів є метод оптимізації структури посівних площ з урахуванням можливих сценаріїв зміни клімату, запропонований у цій статті. Він полягає в пошуку такого розподілу загальної посівної площі між зерновими культурами, який забезпечить максимум середньої врожайності за умови обмежень на ризик відхилення середньозваженої врожайності від математичного сподівання цього показника. Відповідно до запропонованого підходу на першому етапі будують модель залежності врожайності від агрокліматичних індикаторів з використанням історичних даних, а потім за допомогою побудованої моделі визначають показники врожайності в майбутньому періоді з урахуванням одного з можливих сценаріїв кліматичних змін. Результати розрахунків свідчать про ефективність запропонованого підходу.

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

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Webber H., Ewert F., Olesen J.E. et al. Diverging importance of drought stress for maize and winter wheat in Europe. *Nature Communications*. 2018. Vol. 9, N 1. Article number 4249. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06525-2>.
2. The state of food security and nutrition in the world 2018. Building climate resilience for food security and nutrition. Rome, FAO. FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO, 2018. P. 182. URL: <https://www.fao.org/3/i9553en/i9553en.pdf>.
3. Climate change and food security: Risks and responses. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015. P. 122. <http://www.fao.org/3/a-i5188e.pdf>.
4. Hertel T.W., Rosch S.D. Climate change, agriculture, and poverty. *Applied Economic Perspectives and Policy*. 2010. Vol. 32, Iss. 3. P. 355–385. <https://doi.org/10.1093/aep/32.3.355>.
5. Сичевський М.П. Глобальна продовольча безпека та місце України в її досягненні. *Економіка АПК*. 2019. № 1. P. 6–17. URL: <http://eap.k.org.ua/contents/2019/01/6>.
6. Golodnikov A.N., Ermol'ev Yu.M., Ermol'eva T.Yu., 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>.
7. Golodnikov A.N., Ermol'ev Yu.M., Ermol'eva T.Yu., 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>.
8. 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>.
9. 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>.
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. 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>.
13. Zrazhevsky G.M., Golodnikov A.N., Uryasev S.P., Zrazhevsky A.G. Application of buffered probability of exceedance in reliability optimization problems. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2020. Vol. 56, N 3. P. 476–484. <https://doi.org/10.1007/s10559-020-00263-4>.
14. Mikhalevich V.S., Knopov P.S., Golodnikov A.N. Mathematical models and methods of risk assessment in ecologically hazardous industries. *Cybernetics and Systems Analysis*. 1994. Vol. 30, N 2. P. 259–273. <https://doi.org/10.1007/BF02366429>.
15. Atoyev K.L., Knopov P.S. Mathematical modeling of climate change impact on relationships of economic sectors. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2023. Vol. 59, N 4. P. 535–545. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00589-9>.
16. 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>.
17. Atoyev K., Knopov P., Pepelyaev V., Kisala P., Romaniuk R., Kalimoldayev M. Chapter 6. The mathematical problems of complex systems investigation under uncertainties. In: *Recent Advances in Information Technology*. Wojcik W., Sikora J. (Eds.). London: CRC Press, 2017. P. 135–171. <http://dx.doi.org/10.1201/9781351243179-6>.
18. Golodnikov A., Kuzmenko V., Uryasev S. CVaR regression based on the relation between CVaR and mixed-quantile quadrangles. *J. of Risk and Financial Management*. 2019. Vol. 12, 107. <https://doi.org/10.3390/jrfm12030107>.
19. Pepelyaev V.A., Golodnikov A.N., Golodnikova N.A. Modeling the impact of climate change on the crop yield. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2023. Vol. 59, N 6. P. 949–955. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00631-w>.
20. 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?
21. Boogaard H., Schubert J., De Wit A., Lazebnik J., Hutjes R., Van der Grijn G. Agrometeorological indicators from 1979 to present derived from reanalysis. Version 1.0. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). 2020. 1 p. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/10.24381/cds.6c68c9bb?tab=overview>.
22. Rockafellar R.T., Uryasev S., Zabarankin, M. Generalized deviations in risk analysis. *Finance Stochast.* 2006. Vol. 10, Iss. 1. P. 51–74. <https://doi.org/10.1007/s00780-005-0165-8>.
23. Portfolio safeguard. URL: <http://www.aorda.com/index.php/portfolio-safeguard>.
24. Зерно. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Зерно>.
25. Efficient frontier: What it is and how investors use it. URL: <https://www.investopedia.com/terms/e/efficientfrontier.asp>.

V.A. Pepelyaev, A.N. Golodnikov, N.A. Golodnikova
METHOD OF OPTIMIZING THE STRUCTURE OF SOWED AREAS
FOR THE ADAPTATION OF CROP TO CLIMATE CHANGES

Abstract. The article is devoted to crop production adaptation to climate change. It considers the problem of finding the future optimal structure of the sown area, considering the possible climate change scenario. It implies finding a distribution of the sown area for different groups of crops that would maximize the average annual yield while limiting the risk of crop failure due to adverse weather conditions. To solve this problem, a mathematical model was developed and used for computations.

Keywords: adaptation to climatic changes, crop production, structure of sown area, risk, optimization, productivity.

Надійшла до редакції 16.01.2024