

<https://doi.org/10.15407/knit2022.02.030>
УДК 004.62, 004.67

М. О. ЄМЕЛЬЯНОВ¹, наук. співроб.
E-mail: primus.spatium@gmail.com
А. Ю. ШЕЛЕСТОВ², проф.
Г. О. ЯЙЛИМОВА², аспірантка
Л. Л. ШУМІЛО¹, молод. наук. співроб.

¹Інститут космічних досліджень Національної академії наук України
та Державного космічного агентства України
Проспект Академіка Глушкова 40, Київ, Україна, 03187

²Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського
Проспект Перемоги 37, Київ, Україна, 03056

ВПЛИВ ЗМІНИ КЛІМАТУ НА ПЛОЩІ ОСНОВНИХ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР

У даній роботі проведено статистичний аналіз часового ряду площ мажоритарних культур за 20 років (з 1998 по 2020 рр.), а також проаналізовано вплив агрокліматичних зон на площі вирощування основних культур. Зміни клімату, що найгостріше відчуються у південних регіонах України, підвищують виробничий ризик в аграрній сфері через зміни температури, режиму опадів та інших екстремальних погодних явищ. Історичні кліматичні дані свідчать про підвищення температури на території України, а прогнози клімату допускають подальше потепління, особливо на півдні України. На основі супутникових та статистичних даних досліджено зміни земної поверхні для визначених областей, для яких характерні найбільші зміни площ посівів основних типів сільськогосподарських культур. Для аналізу динаміки посівних площ у кліматичних зонах використовуються національні статистичні дані за 1998—2019 рр., карти класифікації земельного покриття за 2016—2020 рр., дані про кліматичні зони по території України за 2000 та 2020 рр., а також контури адміністративних одиниць рівня NUTS2. Оскільки для багатьох районів немає статистичних даних за 2019—2020 рр. у зв'язку із реформуванням територіальних меж, замість статистичних даних використано посівні площі, отримані на основі супутникової інформації. Як додаткова та альтернативна інформація для аналізу посівних площ були використані карти класифікації посівів за 2016—2020 рр., отримані за власними технологіями глибинного навчання фахівцями Інституту космічних досліджень НАНУ та ДКАУ. Карти класифікації отримано з використанням відкритих супутникових даних програми Copernicus: SAR «Sentinel-1» та «Sentinel-2» з просторовим розрізненням 10 м. Порівняння статистичних даних зі значеннями площ посівів, отриманими за супутниковими даними, здійснюється з використанням метрики статистичного аналізу коефіцієнта кореляції (r). Для оцінки точності також використовується коефіцієнт детермінації R^2 між статистичною площею основних культур і площею за супутниковими даними.

Ключові слова: зміни клімату, супутникові дані, глибинне навчання, карти класифікації, «Sentinel-1», «Sentinel-2».

ВСТУП

Сільське господарство є найважливішим сектором економіки України, і в період з 2005 по 2012

рік його внесок у валовий внутрішній продукт країни становив у середньому 10 % [16].

Сільськогосподарське виробництво багато в чому залежить від погодних умов і, як наслідок,

Цитування: Ємельянов М. О., Шелестов А. Ю., Яйлимова Г. О., Шуміло Л. Л. Вплив зміни клімату на площі основних сільськогосподарських культур. *Космічна наука і технологія*. 2022. **28**, № 2 (135). С. 30—38. <https://doi.org/10.15407/knit2022.02.030>



Рис. 1. Екологічні зони України

від довгострокових тенденцій і змін кліматичних умов [9]. Висока мінливість погоди сприяє суттєвим коливанням врожайності, що спостерігається в Україні, а зміни клімату підвищують виробничий ризик та загрозу майбутньому рослинництву через зміни температури, режиму та об'єму опадів і все частішим виникненням екстремальних погодних явищ. Історичні кліматичні дані свідчать про підвищення температури на території України, а прогнози клімату допускають подальше потепління, особливо на півдні України. Зміни клімату по-різному впливають на врожайність через кількість опадів і екстремальні температури [11]. Наприклад, аномальні явища, такі як від'ємна температура восени або сильна спека навесні, можуть призвести до значних втрат врожаю пшениці [14]. Також відомо, що в усьому світі екстремальна спека призводить до значного зниження врожайності зернових [7], і є переконливі докази того, що частота екстремальних явищ найближчим часом буде збільшуватися у багатьох регіонах світу [10].

Проте українське сільське господарство може отримати і позитивний вплив змін клімату в де-

яких регіонах через підвищення зимових температур і збільшення зимових опадів, більш тривалого безморозного сезону і вищої концентрації CO_2 [8]. Відповідно орні землі можуть розширюватися, особливо на півночі України, але такі прогнози на даний момент є недостатньо визначеними.

З огляду на вищенаведене, основною метою даного дослідження є оцінка впливу зміни погодних параметрів на врожайність та зміни загальної площі кожної із мажоритарних сільськогосподарських культур на території України.

ЕКОЛОГІЧНІ ЗОНИ

В Україні континентальний клімат супроводжується жарким літом і холодною зимою. Кількість опадів поступово зменшується, а температура підвищується з півночі на південь. На близько 48 % території країни містяться високородючі чорноземи, і переважно у південних регіонах [2].

Кліматичні і ґрунтові умови дозволяють розділити Україну на три основні кліматичні зони, які характеризуються різними екологічними

умовами, важливими для сільськогосподарського виробництва [3]: змішаний ліс, лісостеп і степ (рис. 1). Дві інші зони в Україні, а саме Карпати на заході і Кримські гори на півдні в даному дослідженні не розглядалися з огляду на дуже низьку кількість посівних площ.

КЛІМАТИЧНІ УМОВИ

У порівнянні з діючою кліматичною нормою щороку середньорічна температура тримається на рівні 1–2° вище норми. За даними НАН України за останні десятиліття відбулося фактичне зміщення меж природно-кліматичних зон країни на 100...150 км на північ. Умови вегетації в традиційній підзоні північного степу (Дніпропетровська, Кіровоградська області та ін.) за останні роки вже де-факто повинні бути віднесені до підзони південного степу [1].

За кліматичним режимом степова частина України поступово наближається до сухих субтропіків, до якої, наприклад, належить територія Греції. Якщо теперішні тенденції зміни клімату збережуться в найближчі 20 років, це стане реальною небезпекою фактичної втрати для інтенсивного землеробства не тільки зони степу, але й понад половини площ орних земель України. За даними досліджень Китайської академії аграрних наук (Chinese Academy of Agricultural Sciences — CAAS) [15] спостерігається негативний тренд між врожайністю основних культур та середніми максимальними та мінімальними температурами за вегетаційний період. Це може призводити до необхідності зрошення навіть таких культур, які раніше цього не потребували, наприклад пшениці, що призведе до значного росту фінансових витрат. Саме тому аграрії змінюють спектр культур на такі, що мають більшу економічну доцільність.

В той же час зміни клімату та зміщення кліматичних зон можуть мати для аграрного сектору також і позитивні наслідки. Саме тому в останні роки в Україні створюються умови для вирощування двох врожаїв за один сезон і не тільки у південних, а й у північних областях. Такі результати на основі аналізу супутникової інформації отримали фахівці Інституту космічних досліджень НАНУ-ДКАУ [5].

Супутникові дані дають можливість відслідковувати зміни земної поверхні та робити певні аналітичні висновки на основі результатів аналізу. На основі супутникових даних можна отримати карти класифікації сільськогосподарських культур і аналізувати, як вони змінюються в різних кліматичних зонах України. Такі зміни насправді відбуваються, і у ході досліджень було визначено області, для яких характерні найбільші зміни площ посівів для основних типів культур. Цей важливий економічний показник можна враховувати в державному управлінні та статистиці.

ВХІДНІ ДАНІ

Для аналізу динаміки посівних площ відносно кліматичних зон використовувалися національні статистичні дані за 1998—2019 рр., карти класифікації земного покриву за 2016—2020 рр., дані про кліматичні зони по території України за 2000 та 2020 рр., а також контури адміністративних одиниць рівня NUTS2 (рівень областей).

На рис. 2 зображено зміщення кліматичних зон на території України.

Офіційні статистичні дані використовувалися на рівні районів для основних мажоритарних культур України (пшениця, соняшник та кукурудза). Для 2019—2020 рр. статистичних даних для багатьох районів немає у зв'язку із реформуванням територіальних меж. Тому замість статистичних даних використано посівні площі, отримані за супутниковою інформацією.

Як додаткову та альтернативну інформацію для аналізу посівних площ використано карти класифікації посівів за 2016—2020 рр., отримані за власними технологіями глибинного навчання фахівцями Інституту космічних досліджень НАНУ та ДКАУ [4]. Використані карти класифікації отримано з використанням відкритих супутникових даних програми Copernicus: SAR «Sentinel-1» та «Sentinel-2» з просторовим розрізненням 10 м. Карти отримано у межах проєктів Світового Банку та “Support to Agriculture and Food Policy Implementation” (SAFPI) [4, 6], що фінансувався Європейським союзом. Для перевірки достовірності карт класифікації для оцінки площ проведено їхнє порівняння зі ста-

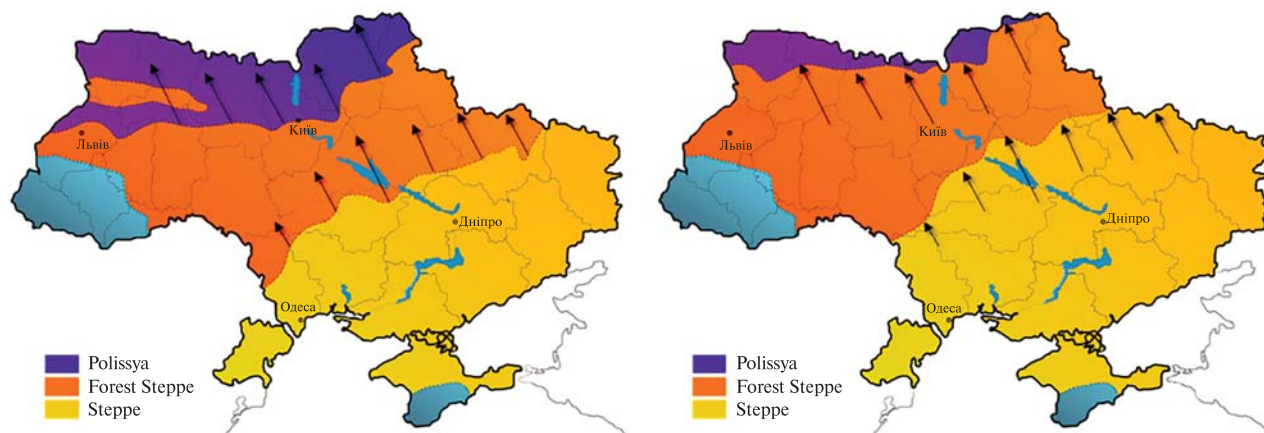


Рис. 2. Зміни меж кліматичних зон України

Таблиця 1. Регіони, на які впливають кліматичні зміни

Область	Райони
<i>Територія А</i>	
Волинська	Турійський
Житомирська	Баранівський, Брусилівський, Хорошівський, Ємільчинський, Коростенський, Коростишівський, Лугинський, Малинський, Радомишльський, Пулинський, Черняхівський
Київська	Бородянський, Броварський, Вишгородський, Києво-Святошинський, Макарівський
Львівська	Бродівський, Радехівський, Сокальський
Рівне	Демидівський, Дубенський, Здолбунівський, Острозький, Радивилівський
Сумська	Середино-Будський, Шосткинський, Ямпільський
Хмельницька	Славутський
Чернігів	Бобровицький, Борзнянський, Козелецький, Коропський, Корюківський, Ніжинський, Носівський, Сосницький
<i>Територія В</i>	
Кіровоградська	Гайворонський, Голованівський, Новоархангельський, Світловодський, Ульяновський
Одеська	Ананівський, Балтський, Подільський, Окнянський, Савранський
Полтавська	Великобагачанський, Глобинський, Диканський, Зіньківський, Карлівський, Козельщинський, Котелевський, Кременчуцький, Полтавський, Решетилівський, Семенівський, Чутівський, Шишацький
Харківська	Богодухівський, Вальківський, Великобурлуцький, Вовчанський, Дергачівський, Зміївський, Золочівський, Коломацький, Краснокутський, Нововодолазький, Печенізький, Харківський, Чугувський, Шевченківський
Черкаська	Городищенський, Звенигородський, Золотоніський, Кам'янський, Катеринопільський, Корсунь-Шевченківський, Лисянський, Маньківський, Смілянський, Тальнівський, Уманський, Черкаський, Чигиринський, Чернобаївський, Шполянський

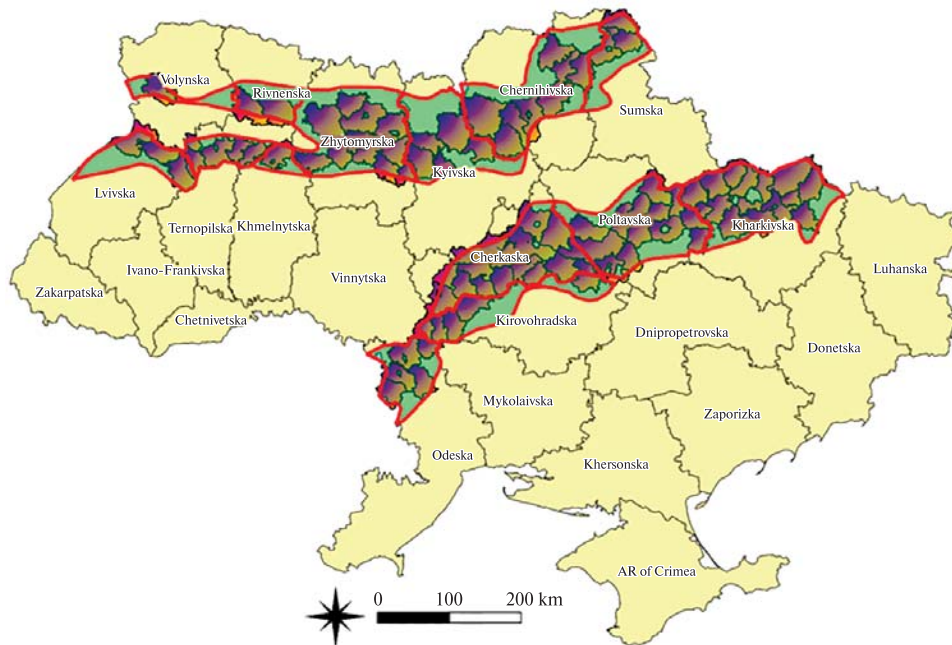


Рис. 3. Території на перетині кліматичних зон, які змінилися, та ділянки, які там розташовані

тистичними даними на рівні районів України за 2016—2020 рр.

Для аналізу змін посівних площ мажоритарних культур виділено території, що перебували на перетині кліматичних зон, які змінилися. На рис. 3 червоними лініями зображено ідентифіковані зони переходу кліматичних зон. У межах цих територій було обрано райони, 80 % від площі яких потрапили у межі переходу кліматичної зони. Верхня частина (А) — це зміна полісся на лісостеп, нижня частина (В) — зміна лісостепу на степ. У табл. 1 представлено площі окремо для території А та території В.

Як вже зазначалося вище, статистичні дані містять значні прогалини у 2019 та 2020 рр., тому для повноцінного аналізу часового ряду даних з 2000 по 2020 рр. використано посівні площі по мажоритарних культурах, отримані за супутниковими даними на основі методів глибинного навчання. Площі, отримані за картами класифікації типів культур за 2016—2018 рр., порівнюються зі статистичними даними.

Після порівняння площ мажоритарних культур за картою класифікації зі статистичними

даними та перевірки їхньої достовірності було проведено аналіз статистичних даних із доповненою інформацією за супутниковими даними за 2016—2020 рр.

ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Порівняння статистичних даних із отриманими площами посівів за супутниковими даними здійснювалось з використанням метрики статистичного аналізу коефіцієнта кореляції (r)

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (s_i - s)(p_i - p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (s_i - s)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (p_i - p)^2}},$$

де s_i — площа сільськогосподарських культур за супутниковими даними, а p_i — площа за статистичними даними, s і p — відповідні середні арифметичні значення, n — кількість регіонів.

Для оцінки точності також було використано коефіцієнт детермінації R^2 між статистичною площею основних культур і площею за супутниковими даними:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \hat{s}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (p_i - p)^2}.$$

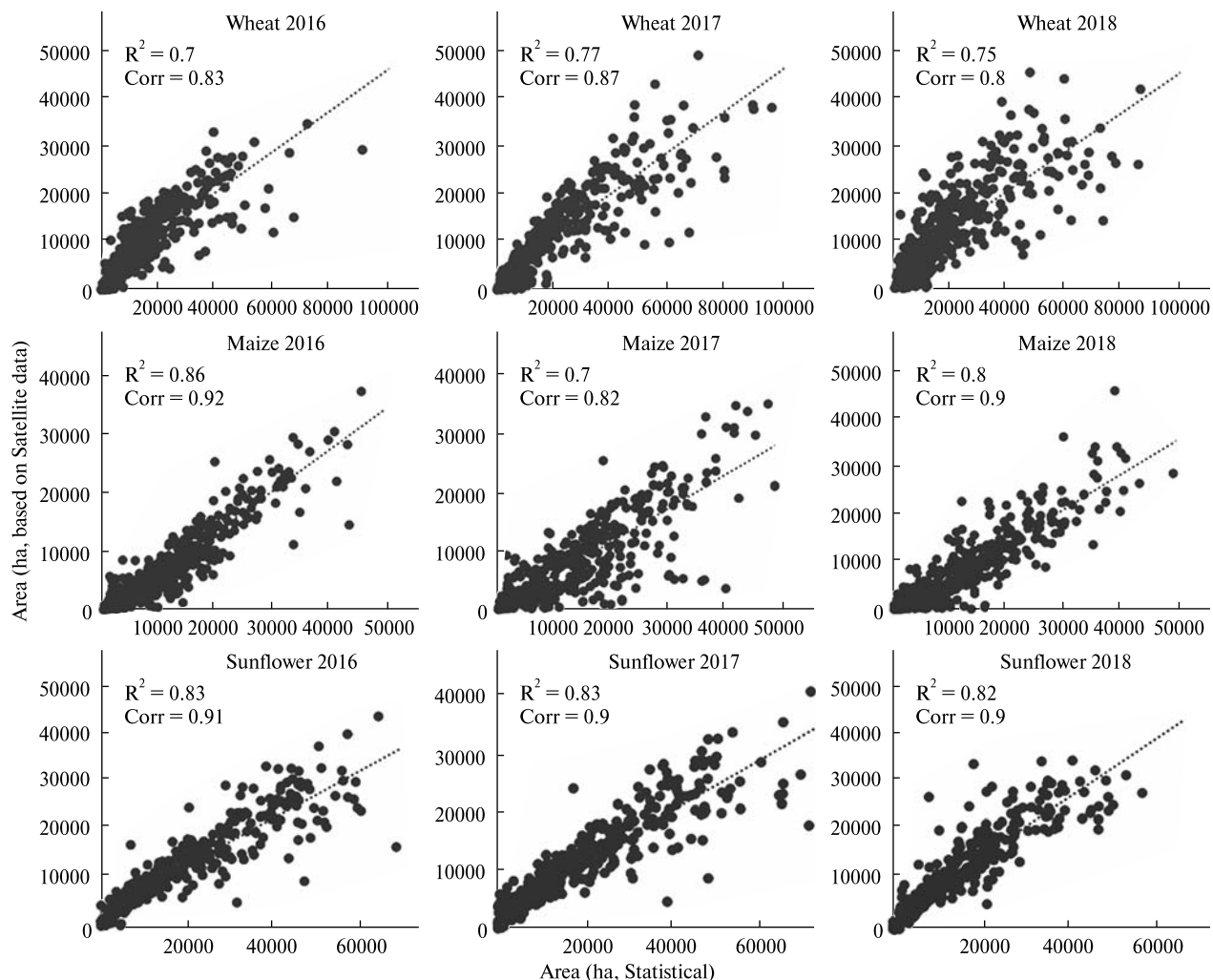


Рис. 4. Порівняння площ за статистичними та супутниковими даними

Таблиця 2. Площі, зайняті кукурудзою та соняшником по роках у зоні Полісся

Культура	1998 р.	1999 р.	2000 р.	2001 р.	...	2016 р.	2017 р.	2018 р.	2019 р.
Кукурудза	9194	8566	14104	21820	...	258902.1	271518.2	316996.1	108037.5
Соняшник	3773	5913	7980	3523	...	185612.6	188358.1	220390.5	130736

На рис. 4 зображено результати порівняння площ основних сільськогосподарських культур за статистичними та супутниковими даними. Видно, що значення коефіцієнта кореляції та регресійного показника перебувають у межах $r = 0.8...0.9$ та $R^2 = 0.7...0.8$. Аналізуючи ці показники, можна зробити висновок, що карти класифі-

кації на рівні країни є достовірною інформацією та можуть бути використані для державних органів влади як додаткова інформація до статистичних даних щодо посівних площ.

Аналізуючи площі, зайняті основними культурами на територіях А та В, можна зробити кілька висновків. Перший з них проілюстровано

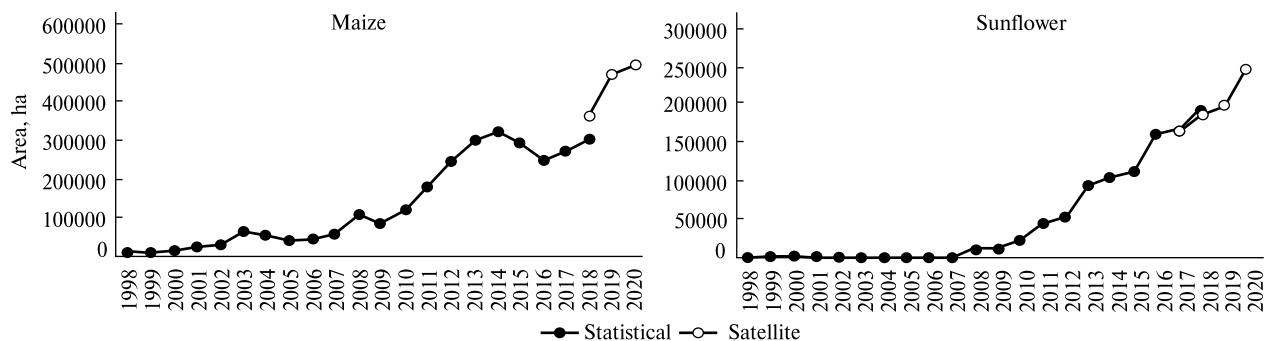


Рис. 5. Зростання посівних площу кукурудзи та соняшнику на території А з 1998 по 2020 р.

на рис. 4. Як видно з табл. 2, починаючи з 1998 р. у зоні полісся значно зросли посівні площі кукурудзи та соняшнику.

Раніше агрокліматичні умови не дозволяли використовувати ці культури у зоні полісся, оскільки вони не встигали дозріти за недостатньої температури. Проте у зв'язку з кліматичними змінами це стало можливим, а в деяких районах Львівської області на даний момент можна отримати два урожаї за сезон з одного поля. Таке дослідження також провадилось у межах проекту Світового Банку. У процесі досліджень було виявлено близько 4 тис. га посівної площі, на яких урожай було зібрано двічі за сезон.

Проте в умовах змін клімату трохи краще себе почуватимуть озимі культури. Позитивним фактором для озимих зернових культур на тлі загального підвищення температури повітря, яке відзначають в останні роки, є порівняно теплі зими, які дозволяють рослинам успішно перезимувати і навіть пройти певний етап у своєму розвитку. На рис. 5 зображено площі на досліджуваних територіях для пшениці за 1998—2020 рр., з чого можна зробити висновок, що для пшени-

ці немає чіткої тенденції зміни площ внаслідок змін клімату.

ВИСНОВКИ

За результатами проведених досліджень можна зробити висновок, що у зоні полісся посівні площі кукурудзи збільшились на 98843 га, а соняшнику — на 126963 га, тоді як для степної зони ці значення дорівнюють 361551 і 473044 га для кукурудзи та соняшнику відповідно.

За проведеними дослідженнями та за результатами порівнянь статистичних даних з даними про посівні площі, які отримані на основі карт класифікації за супутниковою інформацією, можна дійти висновку, що супутникові дані можуть ефективно використовуватися спільно з іншими джерелами даних, зокрема статистичними.

Дослідження виконувались в межах проекту Національного Фонду Досліджень України 2020.01/0273 «Інтелектуальні моделі і методи визначення індикаторів деградації земель на основі супутникових даних».

REFERENCES

1. Abstracts of the II International scientific-practical conference «Climate change and agriculture. Challenges for agricultural science and education», April 10–12, 2019. SI NMC «Agroosvita», Kyiv — Mykolaiv — Kherson, 2019. 495 p.
2. FAO, IIASA, ISRIC, ISS-CAS, and JRC (2009). Harmonized World Soil Database (version 1.1). Harmonized World Soil Database (version 1.1). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.
3. Keyzer M. A., Merbis M. D., Witt R., Heyets V., Borodina O., Prokopa I. (2012). *Farming and rural development in Ukraine: making dualisation work*. Farming and rural development in Ukraine: making dualisation work. Institute for Prospective Technological Studies, Joint Research Centre.
4. Kussul N., Lavreniuk M., Shelestov A., Skakun S. (2018). Crop inventory at regional scale in Ukraine: developing in season and end of season crop maps with multi-temporal optical and SAR satellite imagery. *European J. Remote Sensing*, **51**, 627–636. DOI: 10.1080/22797254.2018.1454265.
5. Kussul N., Shelestov A., Yailymov B., Yailymova H., Lavreniuk M., Shumilo L., Bilokonska Y. (2020). Crop monitoring technology based on time series of satellite imagery. *IEEE 11th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT)*, 346–350. DOI: 10.1109/DESSERT50317.2020.9125031.
6. Kussul N. (2020). *Satellite Agricultural Monitoring in Ukraine at Country Level: World Bank Project*. IGARSS 2020–2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE., 1050–1053. DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9324573
7. Lesk C., Rowhani P., Ramankutty N. (2016). Influence of extreme weather disasters on global crop production. *Nature*, **529**(7584), 84–87.
8. Lioubimseva E., Beurs K. M., Henebry G. M. (2013). *Grain Production Trends in Russia, Ukraine, and Kazakhstan in the Context of the Global Climate Variability and Change*. Grain Production Trends in Russia, Ukraine, and Kazakhstan in the Context of the Global Climate Variability and Change / Eds T. Younos, C. A. Grady. Berlin: Springer, 121–141.
9. Nelson G. C., Valin H., Sands R. D., Havlík P., Ahammad H., Deryng D., Elliott J., Fujimori S., Hasegawa T., Heyhoe E., Kyle P., Von Lampe M., Lotze-Campen H., Mason d’Croz D., van Meijl H., van der Mensbrugge D., Müller C., Popp A., Robertson R., Robinson S., Schmid E., Schmitz C., Tabau A., Willenbockel D. (2014). Climate change effects on agriculture: Economic responses to biophysical shocks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **111**(9), 3274–9.
10. Porter J. R., Xie L., Challinor A. J., Cochrane K., Howden S. M., Iqbal M. M., Lobell D. B., Travasso M. I. (2014). *Food security and food production systems*. Food security and food production systems / Eds C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D.
11. Schlenker W., Roberts M. J. (2009). Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **106**(37), 15594–98.
12. Shelestov A., Lavreniuk M., Vasiliev V., Shumilo L., Kolotii A., Yailymov B., Yailymova H. (2020). Cloud approach to automated crop classification using Sentinel-1 imagery. *IEEE Transactions on Big Data*, **6**(3), 572–582. DOI: 10.1109/TBDATA.2019.2940237.
13. State Statistics Service of Ukraine. URL: <http://www.ukrstat.gov.ua/> (Last accessed 10.05.2021).
14. Tack J., Barkley A., Nalley L. L. (2015). Effect of warming temperatures on US wheat yields. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **112**(22), 6931–6936.
15. Tao F., Yokozawa M., Xu Y., Hayashi Y., Zhang Z. (2006). Climate changes and trends in phenology and yields of field crops in China, 1981–2000. *Agricultural and forest meteorology*, **138**(1–4), 82–92. DOI: 10.1016/j.agrformet.2006.03.014.
16. World Bank (2016). *World Development Indicators 2016*. Washington, D.C.: The World Bank.

Стаття надійшла до редакції 07.10.2021

Після доопрацювання 20.04.2022

Прийнято до друку 20.04.2022

Received 07.10.2021

Revised 20.04.2022

Accepted 20.04.2022

*M. O. Yemelyanov*¹, Researcher

E-mail: primus.spatium@gmail.com

*A. Yu. Shelestov*², Professor

*H. O. Yailyмова*², Postgraduate Student

*L. L. Shumilo*¹, Junior Researcher

¹ Space Research Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine
40 Glushkova Ave., build. 4/1, Kyiv, 03187 Ukraine

² National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
37, Peremohy Ave., Kyiv, 03056 Ukraine

IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON THE AREA OF MAJOR CROPS

In this work, a statistical analysis of the time series of areas of majoritarian crops for 20 years (from 1998 to 2020) is carried out, and the influence of agro-climatic zones on the area of cultivation of major crops is analyzed. Climate change is acutely felt in the southern regions of Ukraine, increasing the production risk in the agricultural sector through changes in temperature, precipitation, and other extreme weather events. Historical climatic data indicate an increase in temperature on the territory of Ukraine, and climate forecasts suggest further warming, especially in the south of Ukraine.

Using satellite and statistical data, changes in the earth's surface are investigated for certain areas, which are characterized by the greatest changes in crop areas for the main types of crops. To analyze the dynamics of cultivated areas in relation to climatic zones, we used national statistical data for 1998–2019, maps of the classification of land cover from 2016–2020, data on climatic zones on the territory of Ukraine for 2000 and 2020, as well as the contours of administrative units of the NUTS2 level. Since statistical data for many districts are not available for the period 2019–2020 due to the reform of territorial boundaries, we used instead cultivated areas obtained from open satellite records. As additional and alternative information for the analysis of acreage, crop classification maps for 2016–2020 were used, obtained by specialists of the Space Research Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine from their own in-depth training technologies.

We used classification maps obtained using open satellite data of the Copernicus program: SAR Sentinel-1 and Sentinel-2 with a spatial resolution of 10 m. A comparison of statistical data and crop areas obtained from satellite data was carried out by applying the metric of statistical analysis of the correlation coefficient (r). To assess the accuracy, the coefficient of determination R^2 between the statistical area of the main crops and the area according to satellite data was also applied.

Keywords: climate change, satellite data, deep learning, classification maps, Sentinel-1, Sentinel-2.