

О.О. Кавац, Ю.В. Кавац, А.Д. Гирка, Ю.О. Кібукевич

АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ СУПУТНИКОВОГО МОНІТОРИНГУ РОЗВИТКУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

Анотація. Зміни клімату все більше впливають на аграрне виробництво європейських країн, сучасні методи супутникових даних пропонують практичні рішення для моніторингу стану розвитку сільськогосподарських культур із подальшим прогнозуванням їх урожайності. Рослинництво, яке значною мірою залежить від природних ресурсів і погодних умов, постійно стикається з такими небезпечними явищами, як різкі перепади температур повітря та режиму вологозабезпечення впродовж вегетаційного періоду, які напряму впливають на продуктивність культур. В статті досліджено вплив гідротермічних умов на стан розвитку сільськогосподарських рослин із застосуванням супутникового моніторингу. Дані зі супутників Landsat-8, Sentinel-1 та Sentinel-2 дозволяють виявляти особливості розвитку рослин у посівах та загрози формуванню продуктивності культур. Дослідження підтвердили, що застосування нечіткої логіки допомагає у плануванні та оптимізації виробництва сільськогосподарських культур в умовах зміни клімату.

Ключові слова: супутниковий моніторинг, Landsat-8, Sentinel-1, Sentinel-2, врожайність, нечітка логіка, радарні дані, розвиток сільськогосподарських рослин, погодні умови.

Постановка задачі. Сільське господарство, а особливо рослинництво, безпосередньо залежить від природних ресурсів та клімату. Негативні зміни погодних умов, такі як аномальна спека, повені, лісові та торф'яні пожежі, суховії, вимерзання, суттєво знижують врожайність сільськогосподарських культур. Наприклад, високі температури порушують здатність рослин отримувати та використовувати вологу, що є одним із чинників зупинки розвитку. Це є серйозною загрозою для продовольчої безпеки, адже сільське господарство є джерелом засобів до існування для великої кількості людей. За даними продовольчої та сільськогосподарської організації об'єднаних націй (ФАО) в найближчі 30 років сільськогосподарське виробництво повинно потроїтися, щоб забезпечити потреби населення у продовольстві.

Ефективним рішенням підвищення продуктивності аграрного виробництва та врожайності є застосування космічних технологій. За допомогою даних дистанційного зондування Землі можна швидко отримувати інформацію про сільськогосподарські угіддя, а саме розмір, географічне розташування ділянки, вид сільськогосподарської культури, стан її розвитку, цифрову модель рельєфу (ЦМР), проведення агротехнічних робіт на полі тощо. Супутниковий моніторинг дозволяє вирішити задачі картографування сільськогосподарських угідь, визначити стан вологості ґрунту та насаджень на різних стадіях розвитку, вчасно виявити

процеси потенційної загрози врожаю, спрогнозувати вплив погодних умов при плануванні агротехнічних робіт.

Аналіз досліджень і публікацій. Численні дослідження показали великий потенціал методів дистанційного зондування для вирішення задач сільськогосподарського напрямку, серед яких оперативне отримання інформації про стан рослинності та вплив погодних умов на її розвиток з подальшим прогнозування врожайності. Автори роботи [1] у дослідженні ставили за мету оцінити вплив опадів на рослинність та порівняти оптичний спектральний показник NDVI із індексом радіолокаційної вегетації (RVI). Порівняння значень двох індексів рослинності показало, що індекс NDVI із загальною точністю понад 70% має найбільшу здатність відокремлювати напівгусту рослинність від густої. Однак індекс RVI є більш ефективним для відокремлення рідкої рослинності. У роботах авторів [2-4] для оцінки стану рослин, наявності хвороб, а також для прогнозування врожайності полів використовували декілька основних оптичних спектральних вегетаційних індексів, такі як NDVI, LAI, EVI. У роботі [5] дослідження показали, що традиційні моделі управління зрошувальними системами не задовольняють необхідні умови аграріїв, тому запропоновано інтелектуальну систему нечіткої логіки, яка заснована на даних зрошування полів. Результати досліджень продемонстрували здатність системи нечіткої логіки з урахуванням кліматичних змін, вирішувати невизначеності, нелінійності зрошувальної системи та встановлювати модель управління високоточними операціями. Автори роботи [6] запропонували ієрархічну нечітку експертну систему для класифікації земельного покриття на супутникових зображеннях середнього просторового розрізнення у районі Ріо-Ранчо, штат Нью-Мексико. У роботі [7] представлений алгоритм прогресивної класифікації, який визначає типи сільськогосподарських культур на основі їх фенологічного розвитку та відповідних характеристик відбиття на багаточасових супутникових знімках чотирьох датчиків Landsat-7 та -8, Sentinel-2A та RapidEye. Він розрізняє типи сільськогосподарських культур у період вегетації, починаючи з ранньої весни, точність класифікації склала 89,49%.

Мета дослідження полягає у розробці та апробації технології супутникового моніторингу врожайності сільськогосподарських культур на основі даних ДЗЗ за допомогою застосування нечіткої логіки з подальшою валідацією на польових дослідних ділянках.

Основна частина. У роботі досліджувалися сільськогосподарські ділянки загальною площею більш ніж 850 га, які належать Державній установі Інститут зернових культур Національної академії аграрних наук України та розташовані у Дніпровському районі Дніпропетровської області, Україна (див. рисунок 1).



Рисунок 1 - Супутникове зображення із векторним шаром дослідної ділянки з озимою пшеницею, Дніпропетровська область, Україна

Клімат регіону помірно континентальний з м'якою зимою. За таких умов зернові культури добре зростають. Середня температура січня становить від $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $-6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$; липня — від $+23,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+22\text{ }^{\circ}\text{C}$. Середньобогаторічна кількість опадів у районі складає 507 мм. Менша їх частина приходить на теплий період, що може ослаблювати розвиток рослин у вегетаційний період.

Основними культурами, які вирощуються в Україні є озима пшениця, ячмінь, кукурудза, ріпак, соняшник, соя та інші. Для дослідження відібрано 15 ділянок площею 209 га із озимою пшеницею, оскільки ця культура є найбільш залежною від погодних умов.

Дослідження оцінки стану розвитку рослин проводилось за допомогою різночасових зображень, отриманих зі супутників Landsat-8, Sentinel-1 та Sentinel-2. У часовий ряд відбирались оптичні супутникові зображення з мінімальним хмарним покриттям за період із січня по грудень 2019 та 2020 року. Для первинних зображень було проведено геометричну та радіометричну корекцію для встановлення відповідності та видалення перешкод [9].

Показники середньої температури повітря та вологості ґрунту, визначають кліматичні умови та напряду впливають на фізіологічні процеси рослин, взаємозв'язок між ними є вагомим критерієм. Наприклад, оптимальна температура сприяє активізації фотосинтезу та росту рослин, тоді як вологість ґрунту регулює доступність води для рослин, що впливає на їх водний обмін та стан кореневої системи.

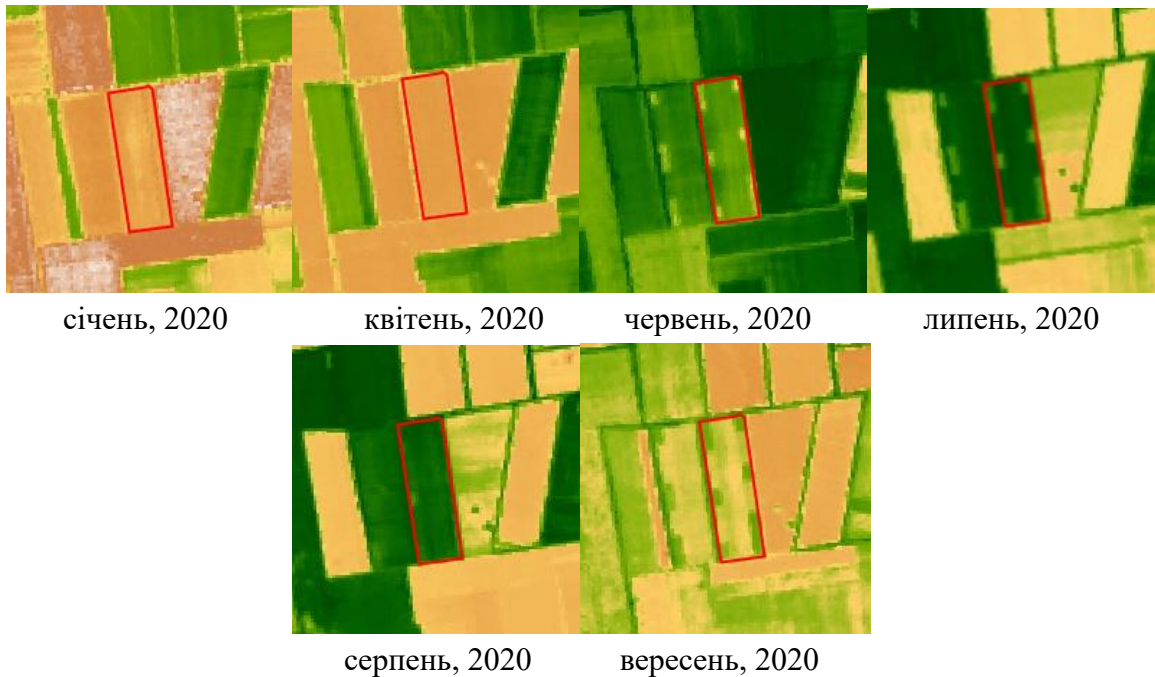


Рисунок 2 - Спектральний індекс NDVI дослідних ділянок з озимою пшеницею із супутникових зображень Sentinel-2, Дніпропетровська область, Україна

Використання нечіткої логіки дозволяє моделювати складні взаємозв'язки між цими факторами та фізіологічними процесами рослин, які часто є неоднорідними та нелінійними. Наприклад, співвідношення температури повітря до фотосинтезу дозволяє краще прогнозувати оптимальний час для збирання врожаю [10] та планувати технологічні заходи з урахуванням прогнозованих кліматичних змін. Теорія нечітких множин базується на плавному переході з одного класу в інший. Елементи можуть мати часткове членство в декількох множинах. Це особливо ефективно при аналізі даних супутникового моніторингу сільськогосподарських культур, оскільки нечіткі підходи дозволяють краще враховувати невизначеність вихідних даних. Наприклад, використання нечітких методів може допомогти краще розпізнати області з різним станом розвитку культур, що має велике значення для ефективного управління сільськогосподарськими землями. Такі підходи використовують різні операції нечіткої логіки, такі як «нечітке І», «нечітке АБО», «нечітке алгебраїчне добуток», «нечітке алгебраїчне сумування» та «нечітке гамма», для об'єднання та аналізу даних оптичних і радарних супутникових знімків сільськогосподарських угідь.

Розробка моделей прогнозування врожайності на основі нечіткої логіки враховує не тільки окремі фактори, а й їх взаємозв'язки, що дозволяє забезпечити більш точні та надійні прогнози в умовах непередбачених змін клімату та середовища. Такий підхід стає важливим інструментом для сільськогосподарських підприємств у вирішенні завдань прогнозування виробництва та забезпечення стабільності у вирощуванні сільськогосподарських культур.

Нормалізований відносний вегетативний індекс (NDVI) – один із основних показників змін рослинності. Розраховується за формулою:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}, \quad (1)$$

де NIR – ближній інфрачервоний канал, R – червоний канал. Для радарних даних NDVI розраховується за формулою:

$$NDVI = \frac{VH - VV}{VH + VV}, \quad (2)$$

де VH та VV поляризації зворотного розсіювання. Діапазон значень NDVI різниться від -1 до +1. Коли рослинність має високу щільність, цей показник ближче до +1, а у разі знищення або захворювання рослинності він зменшується до 0. Значення вегетаційного індексу NDVI та показники вологості ґрунту для оптичних зображень наведені на рисунку (1).

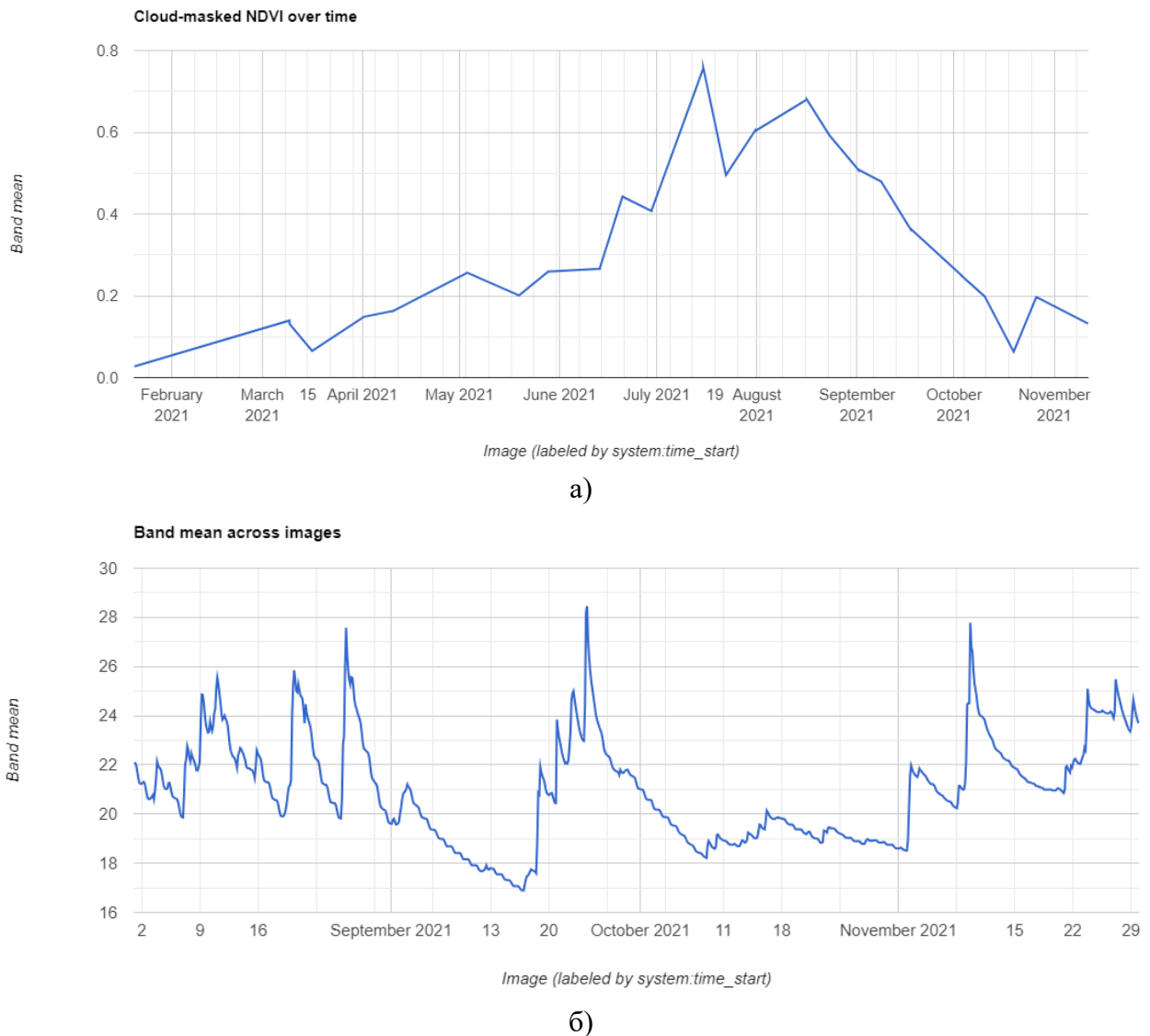


Рисунок 3 - Часові ряди показників розрахованих за оптичним супутниковим зображенням Sentinel-2: а) вегетаційного індексу NDVI; б) вологості ґрунту

У роботі розроблено інтелектуальну нечітку систему, яка заснована на точних даних про стан ґрунту і може створювати карти прогнозування стану посівів сільськогосподарських культур на визначених ділянках (Рис. 2 і 3).

Набір нечітких правил для оцінки стану посівів

Нечіткі вхідні дані			Нечіткі вихідні дані
Вологість ґрунту	Температура повітря	NDVI	Стан посівів
низька	низька	низький	низький
низька	низька	середній	низький
низька	низька	високий	нормальний
низька	середня	високий	нормальний
середня	середня	низький	нормальний
середня	середня	середній	нормальний
середня	середня	високий	високий
середня	висока	середній	низький
висока	низька	середній	нормальний
висока	низька	високий	нормальний

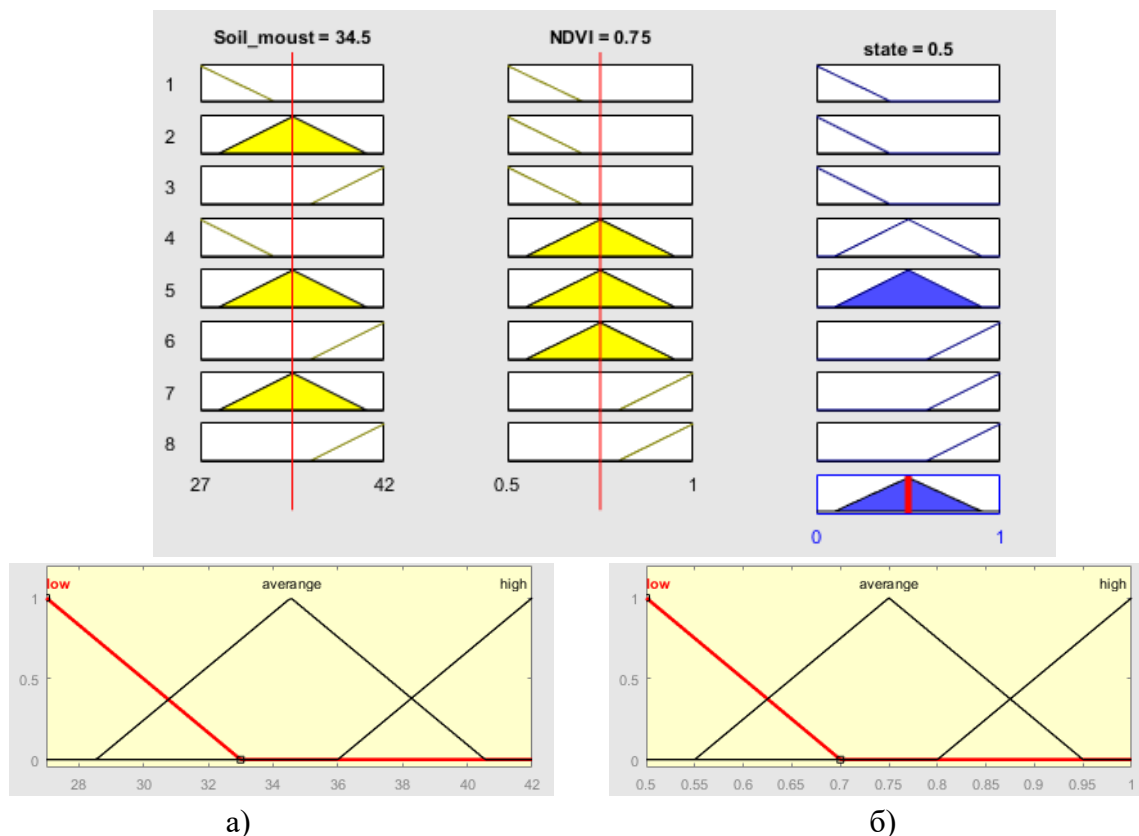


Рисунок 4 – Функції приналежності для вхідних даних:
а) вологість ґрунту верхнього шару; б) NDVI

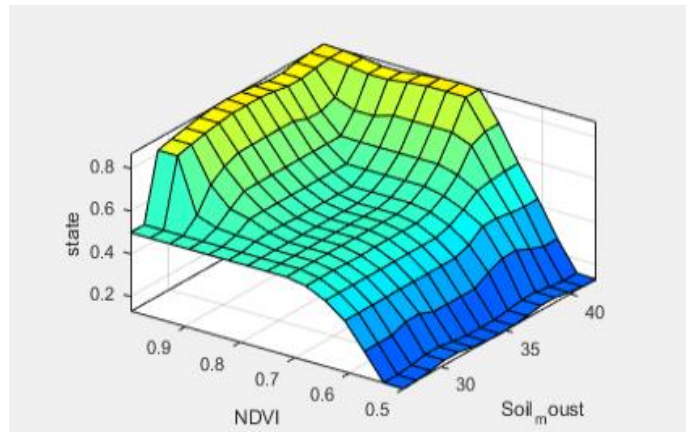


Рисунок 5 – Карта прогнозування стану посівів сільськогосподарських культур

Висновки. Розглянуто інформаційну технологію супутникового моніторингу розвитку сільськогосподарських рослин на основі нечіткої логіки. Запропонований підхід дозволяє моделювати складні взаємозв'язки між різними зовнішніми факторами та фізіологічними процесами самої рослин. В роботі досліджено часові ряди радарних та оптичних супутникових даних за дослідними ділянками. Оскільки досліджувались ділянки з озимими культурами, до моніторингу обирався час з пізньої осені до літа наступного року. В часовий ряд потрапили відфільтровані оптичні дані, з мінімальним покриттям хмарності за певний період. Визначено, що із залученням нечіткої логіки до супутникового моніторингу можна спрогнозувати стан та розвиток рослин сільськогосподарських культур, враховуючи погодні умови регіону і при певних відхиленнях вчасно спланувати додаткові операції на полі для поліпшення стану рослин у посівах.

ЛІТЕРАТУРА

1. S.Yaghabi, Heidarizadi Z., Mirzapour H. "Comparing NDVI and RVI for forest density estimation and their relationships with rainfall." *Environmental Resources Research* (2019) : Vol. 7, No. 2.
2. Roberto Filgueiras. Crop NDVI Monitoring Based on Sentinel 1/Roberto Filgueiras, Everardo Chartuni Mantovani, Daniel Althoff, Elpidio Inácio Fernandes Filho, Fernando França da Cunha//*Remote Sens.* –11, 1441, 2019.
3. Dinesh Kumar. Radar Vegetation Index as an Alternative to NDVI for Monitoring of Soyabean and Cotton/Dinesh Kumar, Srinivasa Rao and Jaswant RAJ Sharma.// *Indian Cartographer.* – Vol. XXXIII, 2013.
4. Alejandro Mestre-Quereda. Time-Series of Sentinel-1 Interferometric Coherence and Backscatter for Crop-Type Mapping/Alejandro Mestre-Quereda, Juan M. Lopez-Sanchez, Fernando Vicente-Guijalba, Alexander W. Jacob, Marcus E. Engdahl// *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* – Vol. 13, 4070 – 4084, 2020.
5. Willians Ribeiro Mendes, Fábio Meneghetti U. Araújo, Ritaban Dutta, Derek M. Heeren. "Fuzzy control system for variable rate irrigation using remote sensing." *Expert Systems With Applications* 124 (2019): 13–24.
6. Yan Wang; M. Jamshidi. "Fuzzy logic applied in remote sensing image classification" *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* (2004). doi: 10.1109/ICSMC.2004.1401402.

7. Katharina Heupel, Daniel Spengler, Sibylle Itzerott. "A Progressive Crop-Type Classification Using Multitemporal Remote Sensing Data and Phenological Information" *Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science* volume (2018): pp. 53–69.
8. Продовольча та сільськогосподарська організація ООН (ФАО), URL: <http://www.fao.org>.
9. Olena Kavats, Volodymyr Hnatushenko, Yuliya Kibukevych, Yurii Kavats. "Flood Monitoring Using Multi-Temporal Synthetic Aperture Radar Images" *CSIT2019* (2019): 046, v3.
10. Olena Kavats, Dmitriy Khramov, Kateryna Sergieieva and Volodymyr Vasyliiev Monitoring Harvesting by Time Series of Sentinel-1 SAR Data, *Remote Sens.* 2019, 11(21), 2496; <https://doi.org/10.3390/rs11212496>

REFERENCES

1. S. Yaghibi, Heidarizadi Z., Mirzapour H. "Comparing NDVI and RVI for forest density estimation and their relationships with rainfall." *Environmental Resources Research* (2019) : Vol. 7, No. 2.
2. Roberto Filgueiras. Crop NDVI Monitoring Based on Sentinel 1/Roberto Filgueiras, Everardo Chartuni Mantovani, Daniel Althoff, Elpidio Inácio Fernandes Filho, Fernando França da Cunha//*Remote Sens.* –11, 1441, 2019.
3. Dinesh Kumar. Radar Vegetation Index as an Alternative to NDVI for Monitoring of Soyabean and Cotton/Dinesh Kumar, Srinivasa Rao and Jaswant RAJ Sharma.// *Indian Cartographer.* – Vol. XXXIII, 2013.
4. Alejandro Mestre-Quereda. Time-Series of Sentinel-1 Interferometric Coherence and Backscatter for Crop-Type Mapping/Alejandro Mestre-Quereda, Juan M. Lopez-Sanchez, Fernando Vicente-Guijalba, Alexander W. Jacob, Marcus E. Engdahl// *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* – Vol. 13, 4070 – 4084, 2020.
5. Willians Ribeiro Mendes, Fábio Meneghetti U. Araújo, Ritaban Dutta, Derek M. Heeren. "Fuzzy control system for variable rate irrigation using remote sensing." *Expert Systems With Applications* 124 (2019): 13–24.
6. Yan Wang; M. Jamshidi. "Fuzzy logic applied in remote sensing image classification" *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* (2004). doi: 10.1109/ICSMC.2004.1401402.
7. Katharina Heupel, Daniel Spengler, Sibylle Itzerott. "A Progressive Crop-Type Classification Using Multitemporal Remote Sensing Data and Phenological Information" *Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science* volume (2018): pp. 53–69.
8. Продовольча та сільськогосподарська організація ООН (ФАО), URL: <http://www.fao.org>.
9. Olena Kavats, Volodymyr Hnatushenko, Yuliya Kibukevych, Yurii Kavats. "Flood Monitoring Using Multi-Temporal Synthetic Aperture Radar Images" *CSIT2019* (2019): 046, v3.
10. Olena Kavats, Dmitriy Khramov, Kateryna Sergieieva and Volodymyr Vasyliiev Monitoring Harvesting by Time Series of Sentinel-1 SAR Data, *Remote Sens.* 2019, 11(21), 2496; <https://doi.org/10.3390/rs11212496>

Received 16.05.2024.

Accepted 22.05.2024.

Analysis of information technology of satellite monitoring of the development of agricultural crops using fuzzy logic

Climate change is increasingly affecting agricultural production in European countries, and modern satellite data methods offer practical solutions for monitoring the development of crops and

subsequently predicting their yields. Crop production, which is largely dependent on natural resources and weather conditions, constantly faces such dangerous phenomena as sharp changes in air temperature and moisture regime during the growing season, which directly affect crop productivity. The article investigates the impact of hydrothermal conditions on the development of agricultural plants using satellite monitoring. Data from Landsat-8, Sentinel-1, and Sentinel-2 satellites allow us to identify the peculiarities of plant development in crops and threats to crop productivity. Studies have confirmed that the use of fuzzy logic helps in planning and optimizing crop production in the face of climate change.

Keywords: satellite monitoring, Landsat-8, Sentinel-1, Sentinel-2, crop yield, fuzzy logic, radar data, crop development, weather conditions.

Кавац Олена Олександрівна – к.т.н., доц., доцент кафедри інформаційних технологій і систем, Українського державного університету науки і технологій.

Кавац Юрій Віталійович – к.т.н., доцент кафедри інформаційних технологій і систем, Українського державного університету науки і технологій.

Гирка Анатолій Дмитрович – д.с.н., професор, головний науковий співробітник лабораторії агробіологічних ресурсів озимих та ярих зернових культур, ДУ Інститут зернових культур Національної академії аграрних наук України.

Кібукевич Юлія Олегівна – аспірант кафедри інформаційних технологій і систем, Українського державного університету науки і технологій.

Kavats Olena Oleksandrivna – Ph.D., Associate Professor of the Department of Information Technology and Systems of Ukrainian State University of Science and Technology.

Kavats Yurii Vitaliyovych – Ph.D., Associate Professor of the Department of Information Technology and Systems of Ukrainian State University of Science and Technology.

Hyрка Anatolii Dmytrovych – doctor of agricultural sciences, professor, chief research scientist of the laboratory of agrobiological resources of winter and spring grain crops, SI Institute of Grain Crops of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine.

Kibukevych Julia – graduate student of the Department of Information Technology and Systems of Ukrainian State University of Science and Technology.