УДК 004.9:528.8

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ НЕЙРОМЕРЕЖЕВОГО АНАЛІЗУ ПРОСТОРОВОЇ СТРУКТУРИ АНТРОПОГЕННИХ ЛАНДШАФТІВ ЗА ДАНИМИ SENTINEL-2

Чумичов Д.Д.[1]; Нікулін С.Л., д-р.геол.наук, професор[1]; Сергєєва К.Л., к.т.н., доцент[1]
[1] Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»
[1] Україна, Дніпро
[1] Chumychov.D.D@nmu.one; nikulin.s.l@nmu.one; sergieieva.k.l@nmu.one

Анотація. *Розроблено інформаційну технологію нейромережевого аналізу супутникових зображень Sentinel-2 для кількісного оцінювання стану антропогенних ландшафтів України за показником Landscape Degradation Indicator (LDI).Технологія забезпечує автоматизоване виявлення деградаційних змін структури земної поверхні, спричинених зменшенням антропогенного навантаження внаслідок війни.*
Ключові слова: *інформаційна технологія; дистанційне зондування; LDI; нейронні мережі; Sentinel-2.*

Вступ. Військові та соціально-економічні кризи істотно змінюють структуру земного покриву, особливо в сільськогосподарських регіонах. Депопуляція та припинення господарської діяльності призводять до деградації антропогенних ландшафтів і втрати продуктивності земель. Дані дистанційного зондування Землі, зокрема отримані з супутників Sentinel-2, надають можливість об'єктивного та оперативного відстеження таких змін на великих територіях [1]. Застосування сучасних інформаційних технологій, алгоритмів оброблення зображень і методів штучного інтелекту дає змогу інтегрувати великі обсяги супутникових даних у єдині аналітичні моделі для оцінки стану ландшафтів [2]. В умовах воєнних дій і депопуляції територій України актуальним є створення інформаційних технологій, що забезпечують автоматизовану оцінку стану антропогенних ландшафтів на основі цифрового аналізу багаточасових супутникових зображень.

Мета роботи полягає у розробленні та апробації інформаційної технології нейромережевого аналізу супутникових зображень Sentinel-2 для кількісного оцінювання стану та динаміки антропогенних ландшафтів України на основі показника Landscape Degradation Indicator (LDI).

Основна частина. Розроблено інформаційну технологію нейромережевого аналізу супутникових зображень Sentinel-2, що забезпечує оцінювання стану та динаміки антропогенних ландшафтів України за показником LDI із використанням методів цифрової обробки, штучного інтелекту, статистичного аналізу та геоінформаційного моделювання [3].

Основою технології є алгоритм розрахунку LDI, який визначається за градієнтами яскравості каналів Sentinel-2 у ковзному вікні, розмір якого обирається в залежності від обраного масштабу досліджень. За результатами розрахунків автоматично формуються карти LDI для різночасових знімків, карти різниць між роками та виконується аналіз моментів їх емпіричних розподілів, а саме середнього, медіани, стандартного відхилення, асиметрії та ексцесу. Часова динаміка медіани та ексцесу LDI використовується як індикатор деградаційних процесів антропогенних ландшафтів і зниження антропогенної активності.

На заключному етапі карти LDI, сумісно з супутниковими зображеннями Sentinel-1 і Sentinel-2, використовуються у якості вхідних даних для класифікації спеціально розробленою системою на основі нейронної мережі з архітектурою U-Net, де в ролі енкодера

застосовано EfficientNetV2-L, попередньо навченої на великому наборі зображень ImageNet-21k із застосуванням механізмів уваги. Навчання нейронної мережі реалізовано з використанням аугментацій даних, оптимізатора AdamW та косинусного планувальника, а створення результуючих карт класифікації за допомогою техніки Test-Time Augmentation.

Інформаційна технологія реалізована у середовищі RAPID GIS 3.2 [4]. Обробка здійснюється на рівні пікселів з просторовою роздільністю 10 метрів для каналів B02, B03, B04 та B08 Sentinel-2 MSI L2A.

Результати дослідження показали чітку залежність між зниженням антропогенного навантаження та зменшенням щільності контурів на знімках Sentinel-2, що відображено у значеннях LDI. Для кожної з 13 досліджених ділянок територій України та суміжних регіонів створено три карти LDI: для 2020 і 2024 років та карту різниць. Статистичний аналіз моментів розподілу LDI показав, що у зонах активних і тривалих бойових дій (ділянки довкола населених пунктів Пологи, Кам'янка, Василівка, Куп'янськ, Волноваха, Великий Бурлук) спостерігається значне зниження медіанних значень (до −33 – −38 %) та збільшення ексцесу (у 3–6 разів), що вказує на деградацію контурної структури ландшафту і різке падіння рівня господарської активності населення.

У контрольних районах без бойових дій (ділянки довкола населених пунктів Магдалинівка, Стара Вижівка) значення LDI залишались стабільними або зростали на 5–10%. На прикордонних територіях (ділянки довкола населених пунктів Великий Бурлук, Броди) зафіксовано просторові зміни LDI, пов'язані не з безпосередніми боями, а з фортифікаційними роботами та переміщенням техніки. Встановлено сильну кореляцію між зміною медіани та ексцесу ($r = -0{,}91$), що свідчить про одночасне зниження різноманітності контурів і їх контрастності.

Карти різниць LDI відображають не лише зони руйнування, а й осередки військової активності, які формують локальні підвищення показника. Найбільші негативні значення LDI спостерігалися у поблизу населених пунктів Пологи, Кам'янка та Куп'янськ, де людська активність практично припинилася. Менші зміни виявлено в Олешках і Рубіжному, де часткове відновлення сільського господарства супроводжується появою нових контурів військового походження.

Порівняння LDI з Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) показало, що LDI є менш чутливим до сезонних і погодних коливань та краще відображає саме структурні зміни ландшафту. Зміна величини вікна згортки (від 30×30 м до 850×850 м) дозволяє деталізувати аналіз від окремих полів до узагальнених регіональних тенденцій.

Висновки. Розроблено інформаційну технологію нейромережевого аналізу супутникових зображень Sentinel-2, яка забезпечує автоматизовану оцінку стану та динаміки антропогенних ландшафтів України за індикатором LDI. Технологія дає змогу виявляти деградаційні процеси, спричинені зниженням антропогенного навантаження, депопуляцією та руйнуванням інфраструктури. Отримані результати продемонстрували високу кореляцію між змінами статистичних моментів LDI та рівнем господарської активності, що підтверджує достовірність методу. Технологія придатна для інтеграції у геоінформаційні системи моніторингу довкілля та підтримки прийняття управлінських рішень. Подальші дослідження спрямовані на вдосконалення алгоритмів за рахунок використання нейромережевих моделей і поєднання LDI з іншими спектральними показниками.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

[1]Dai, K., Cheng, C., Kan, S., Li, Y., Liu, K., & Wu, X. (2024). Impact of arable land abandonment on crop production losses in Ukraine during the armed conflict. *Remote Sensing, 16*(22), 4207. https://doi.org/10.3390/rs16224207

[2]Kussul, N., Yailymova, H., Drozd, O. (2022). Assessment of war-damaged croplands in Ukraine using Sentinel data. *Remote Sensing Letters*, 13(9), 923–933. https://doi.org/10.1016/j.jag.2025.104551

[3]Nikulin, S., & Sergieieva, K. (2025). Assessing degradation of war-affected anthropogenic landscape using Sentinel-2 images. *International Journal of Remote Sensing*, 46(18), 5732–5772. https://doi.org/10.1080/01431161.2025.2526001

[4]Busygin, B. S., Nikulin, S. L., & Sergieieva, K. L. (2019). Solving the tasks of subsurface resources management based on the created GIS RAPID geoinformation technology. *Mining of Mineral Deposits, 13*(3), 49–57. https://doi.org/10.33271/mining13.03.049

Chumychov D.D., Nikulin S.L., Sergieieva K.L.

Information technology for neural network analysis of the spatial structure of anthropogenic landscapes based on Sentinel-2 data

Abstract. *Information technology for neural network analysis of Sentinel-2 satellite images has been developed to quantitatively assess the state of anthropogenic landscapes in Ukraine using the Landscape Degradation Indicator (LDI). Technology enables the automated detection of changes in the Earth's surface structure caused by a reduction in anthropogenic pressure, resulting from the war.*

Keywords: *information technology; remote sensing; LDI; neural networks; Sentinel-2.*