

3. АНАЛІЗ ІНДИКАТОРІВ ЕКОНОМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ НА ОСНОВІ РІЗНОМІРНИХ ДАНИХ

Наталія Куссуль, професор¹

Андрій Шелестов, професор¹

Богдан Яйлимов, завідувач відділу²

Ганна Яйлимова, доцент¹

Андрій Колотій, старший викладач¹, старший науковий
співробітник²

Олександр Пархомчук, асистент¹

¹ Кафедра математичного моделювання та аналізу даних
Навчально-науковий Фізико-технічний інститут
Національний технічний університет України "Київський
політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

² Відділ космічних інформаційних технологій і систем
Інститут космічних досліджень НАН України та ДКА
України

nataliia.kussul@lll.kpi.ua, andrii.shelestov@gmail.com,
yailymov@gmail.com, annayailymova@gmail.com,
andrew.k.911@gmail.com, omparkhomchuk@gmail.com

ВСТУП

У сучасних умовах стрімкого розвитку технологій та глобальних викликів економічна діяльність набуває нового значення, вимагаючи від науковців і практиків більш глибокого та різностороннього аналізу. Економіка вже не обмежується класичними підходами до оцінки показників і потребує інтеграції нових джерел даних, що дозволяють побудувати більш об'єктивні та комплексні моделі розвитку, які можуть оперативно відображати зміни економічних процесів. Особливої актуальності цей підхід набуває в умовах кризових ситуацій, зокрема, у контексті військових дій, які кардинально впливають на різні сектори економіки, змінюючи структури регіональних економік, динаміку виробничих процесів і доступність трудових ресурсів.

В цьому розділі розглядаються приклади аналізу непрямих індикаторів економічної діяльності (нічне освітлення, показники якості повітря та рівні використання земель сільськогосподарського призначення, отримані за допомогою супутникових даних), які використовують новітні методи збору та

3.3. Аналіз індикаторів економічної діяльності на основі різномірних даних

обробки даних. Серед них ключову роль відіграють супутникові дані, оскільки їх використання дає змогу в умовах недостатності традиційних статистичних даних робити висновки про динаміку економічної активності на регіональному рівні. Особливо важливим є застосування цих технологій для моніторингу сільськогосподарських угідь та визначення збитків, спричинених військовими діями.

Зокрема, супутникові дані допомагають виявляти найбільш постраждалі регіони, що дозволяє уряду і міжнародним організаціям приймати обґрунтовані рішення щодо підтримки аграрного сектору. Іншим важливим напрямом є кореляція між рівнем нічного освітлення та економічною активністю, що дозволяє оцінити вплив воєнних дій на міські агломерації та економічну інфраструктуру країни. Тому дослідження на основі непрямих індикаторів є не лише актуальними, а й надзвичайно важливими для прогнозування відновлення та розвитку економіки України в умовах сучасних викликів.

В цьому розділі міститься огляд напрямків аналізу взаємозв'язків між непрямыми індикаторами економічної активності та економічними показниками регіонів у вигляді конкретних прикладних задач. Використовуючи супутникові дані високого просторового розрізнення та новітні методи геопросторового аналізу, запропоновано комплексний підхід до моніторингу економічної активності та відстеження динаміки змін в умовах кризи.

3.1. ВИЯВЛЕННЯ ОЗНАК ЕКОНОМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ В РЕГІОНАХ ЗА ДАНИМИ РІЗНОЇ ПРИРОДИ

3.1.1. ОЦІНКА ДИНАМІКИ ЕКОНОМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ЗА ЯКІСТЮ ПОВІТРЯ

Дані про якість повітря надають важливу інформацію про вплив промисловості та інших економічних факторів на навколишнє середовище та здоров'я населення.

Сервіс моніторингу атмосфери програми Copernicus (CAMS) [1] розроблений для обміну даними та обробки інформації про поверхню Землі, аерозолі, озон та інші хімічно активні гази з метою підтримки процесів прийняття рішень, підприємств та громадян розширеною інформацією про стан атмосфери. Зокрема, цей сервіс надає щоденні погодинні дані про $PM_{2.5}$ та PM_{10} у вигляді близького до реального часу аналізу для Європи та України

з просторовим розрізненням 11 км. У цьому підрозділі досліджується взаємозв'язок між якістю повітря та рівнем економічної активності в функціональних міських зонах (ФМЗ) та областях України за 2019-2022 рр. [2, 3]. Як основу для отримання ФМЗ для найбільших міст України було обрано методику Європейської комісії [4], [5]. ФМЗ для України визначено у чотири етапи, що детально описано в [6].

В результаті проведеного аналізу, для основних ФМЗ рівні середнього акумульованого за рік показнику $PM_{2.5}$ для 2018-2021 рр. на 18-28% вищі порівняно зі значеннями для 2022 року (рис. 1). Основний спад припав на регіони України, які постраждали від вторгнення Росії [7].

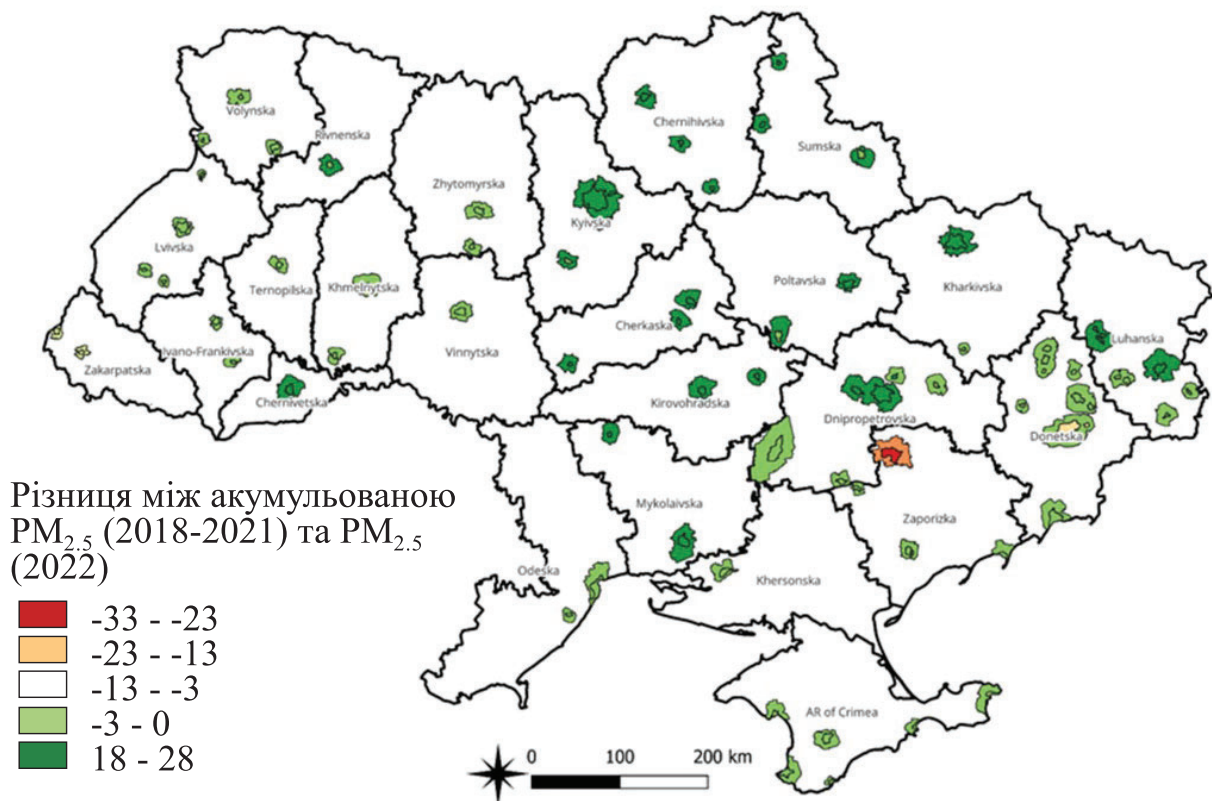


Рис. 1. Порівняння рівнів $PM_{2.5}$ для основних ФМЗ за 2018-2021 рр. проти 2022 р.

Станом на 1 лютого 2022 р. загальна кількість громадян України за переписом [8] становила близько 41 мільйон осіб. Після початку війни близько 8 мільйонів українців зареєстровано у Європейському Союзі та близько 3 мільйонів мігрували до Білорусії та Росії [9]. Кумулятивні значення PM для ФМЗ показують досить близьке відсоткове зниження в порівнянні з динамікою чисельності населення (тобто існує кореляція між

3.3. Аналіз індикаторів економічної діяльності на основі різномірних даних

кумулятивними значеннями РМ та населенням великих міст). З отриманих результатів можна припустити, що кумулятивні річні концентрації твердих частинок над ФМЗ можуть бути використані як приблизний показник для оцінки міграційних процесів [10].

Таблиця 1 Структура валової доданої вартості в Україні у 2020 р.

Вид економічної діяльності	Обсяг ВВП, млн грн	Частка
Оптова та роздрібна торгівля, ремонт автотранспортних засобів і мотоциклів	585 344	13.96 %
Переробна промисловість	425 067	10.13 %
Сільське господарство, лісове господарство та рибне господарство	388 726	9.27 %
Державне управління й оборона, обов'язкове соціальне страхування	303 059	7.23 %
Операції з нерухомим майном	267 661	6.38 %
Транспорт, складське господарство, поштова та кур'єрська діяльність	262 408	6.26 %
Інформація та телекомунікації	208 427	4.97 %
Добувна промисловість і розроблення кар'єрів	190 343	4,54 %
Освіта	180 980	4.32 %
Професійна, наукова та технічна діяльність	136 832	3.26 %

Ліси відіграють важливу роль у зниженні рівня дрібнодисперсних твердих часток РМ (particulate matter), зокрема РМ_{2.5} і РМ₁₀, у повітрі [11]. Зокрема лісові насадження забезпечують фільтрацію та поглинання часток РМ (листя дерев діє як природний фільтр для часток РМ, оскільки тверді частки осідають на поверхні листя і поглинаються або утримуються рослинами), крім цього крони дерев знижують концентрацію пилу та інших аерозолів у повітрі, сповільнюючи їхній рух.

Інтенсифікація вирубок [12] має негативний вплив на рівні якості повітря. Так, аналізуючи взаємозв'язок валового річного продукту (ВРП) по областях України з річним прибутком у сфері діяльності лісівництва (згідно даних з служби державної статистики України https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2021/fin/pdsg/orpsg_ved_15-20.xlsx), можна спостерігати позитивну кореляцію (рис. 2 – помаранчевий стовпець). Дані наведено не для всіх областей, оскільки для деяких з них статистична інформація є конфіденційною та не надається державною службою статистики. У свою чергу взаємозв'язок річного прибутку у сфері діяльності лісівництва з якістю повітря є негативним (тобто при збільшенні прибутку від лісівництва показник $PM_{2.5}$ зменшується або якість повітря покращується (рис. 2, зелений стовпець)).

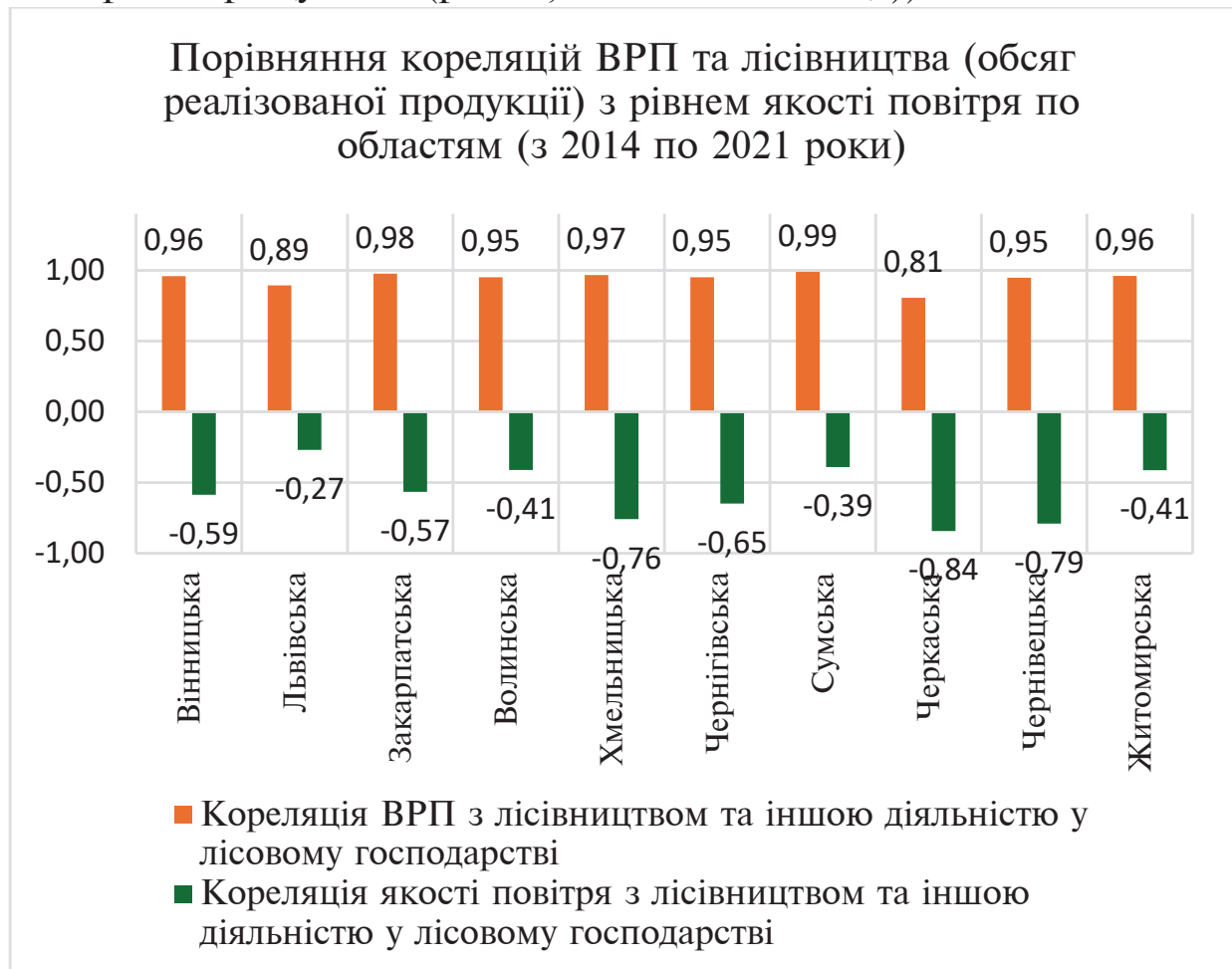


Рис. 2. Порівняння кореляцій ВРП та лісівництва (обсяг реалізованої продукції) з рівнем якості повітря по областям (з 2014 по 2021 роки)

Отриманий результат має логічне пояснення, оскільки діяльність та прибуток лісівництва залежить від загальної площі

3.3. Аналіз індикаторів економічної діяльності на основі різномірних даних

лісових господарств в області. А ліси в свою чергу покращують якість повітря. Тому кумулятивні річні концентрації твердих частинок по областям (чи в інших адміністративних розрізах) можуть бути використані як приблизний показник економічної діяльності (зокрема і лісової).

3.1.2. ОЦІНКА ДИНАМІКИ ЕКОНОМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ ЗА НІЧНИМ ОСВІТЛЕННЯМ

Випромінювання нічного світла у видимому діапазоні дає унікальну можливість безпосередньо спостерігати за діяльністю людини з космосу. Ці дані можна використовувати в різноманітних задачах, включаючи картографування міських територій, оцінку населення та ВВП, моніторинг катастроф і конфліктів. Зовсім недавно супутникові дані нічних вогнів знайшли застосування для розуміння впливу випромінювання світла на навколишнє середовище (світлового забруднення), включно з їх впливом на здоров'я людини [13].

В запропонованому підході використовується продукт VIIRS Stray Light Corrected Nighttime Day/Night Band Composites, наявний у хмарній платформі Google Earth Engine [14]. Цей набір даних надає інформацію про нічну освітленість поверхні Землі, отриману за допомогою супутникового зондування інструментом Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Значення вимірюються в нановатах настерадіан на квадратний сантиметр (nanoWatts/sr/cm^2), де нановат — це одиниця вимірювання потужності, яка дорівнює одній мільярдній частині вату, а стерадіан — це одиниця вимірювання просторового кута, що відповідає площі сферичної поверхні, на яку вона проєктується. Цей продукт може бути корисним для виявлення ознак економічної діяльності з різних причин. Зокрема, чим більшою є нічна освітленість у певному регіоні, тим ймовірніше, що там розташовані великі міста або промислові об'єкти. Це може служити показником рівня розвитку та економічної активності в цьому районі. За допомогою цих даних можна виявити промислові області та комплекси, які відрізняються високим рівнем нічної освітленості, що може бути ознакою великих виробничих потужностей. Аналізуючи зміни в нічній освітленості протягом часу, можна виявити тенденції розвитку економічних зон та торговельних шляхів. Спостереження за нічним освітленням також

може допомогти виявити зміни в економічній активності під час природних катастроф, гуманітарних криз, епідемій чи війни.

Нижче (рис. 3 - 5) наведені усереднені значення показників нічного освітлення для території України за 2013, 2021 та 2022 роки.

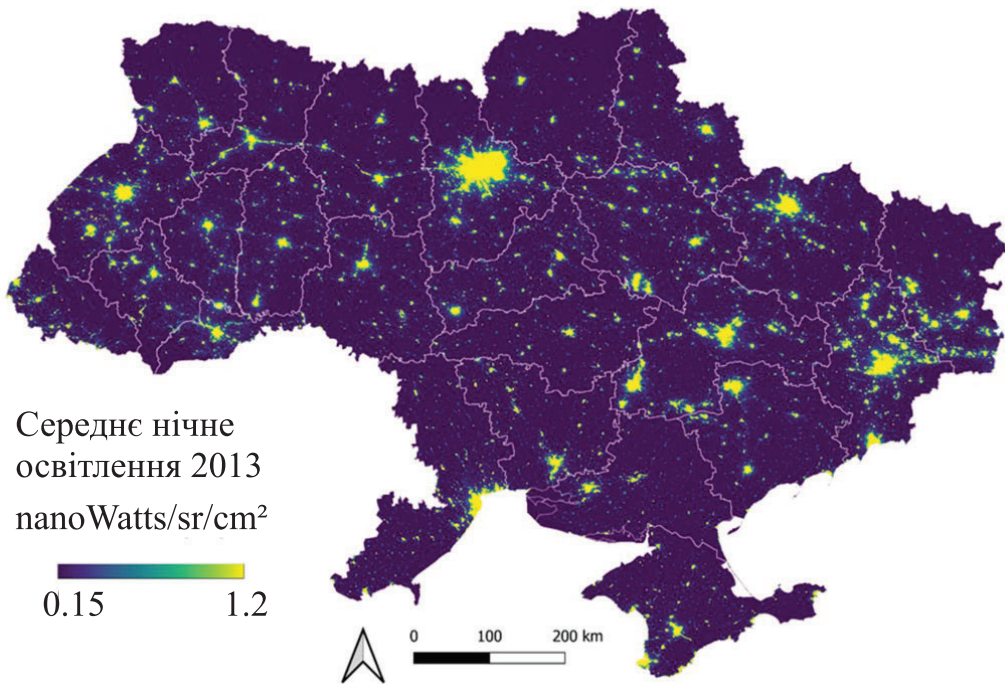


Рис. 3. Річні усереднені значення нічного освітлення у 2013 році

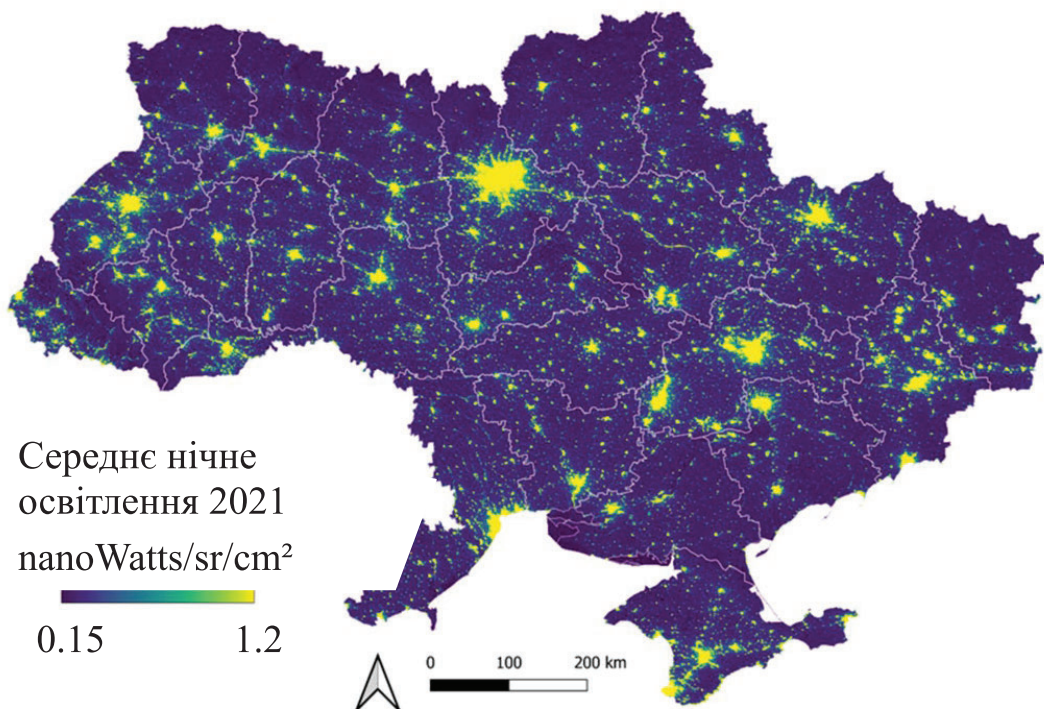


Рис. 4. Річні усереднені значення нічного освітлення у 2021 році

3.3. Аналіз індикаторів економічної діяльності на основі різномірних даних

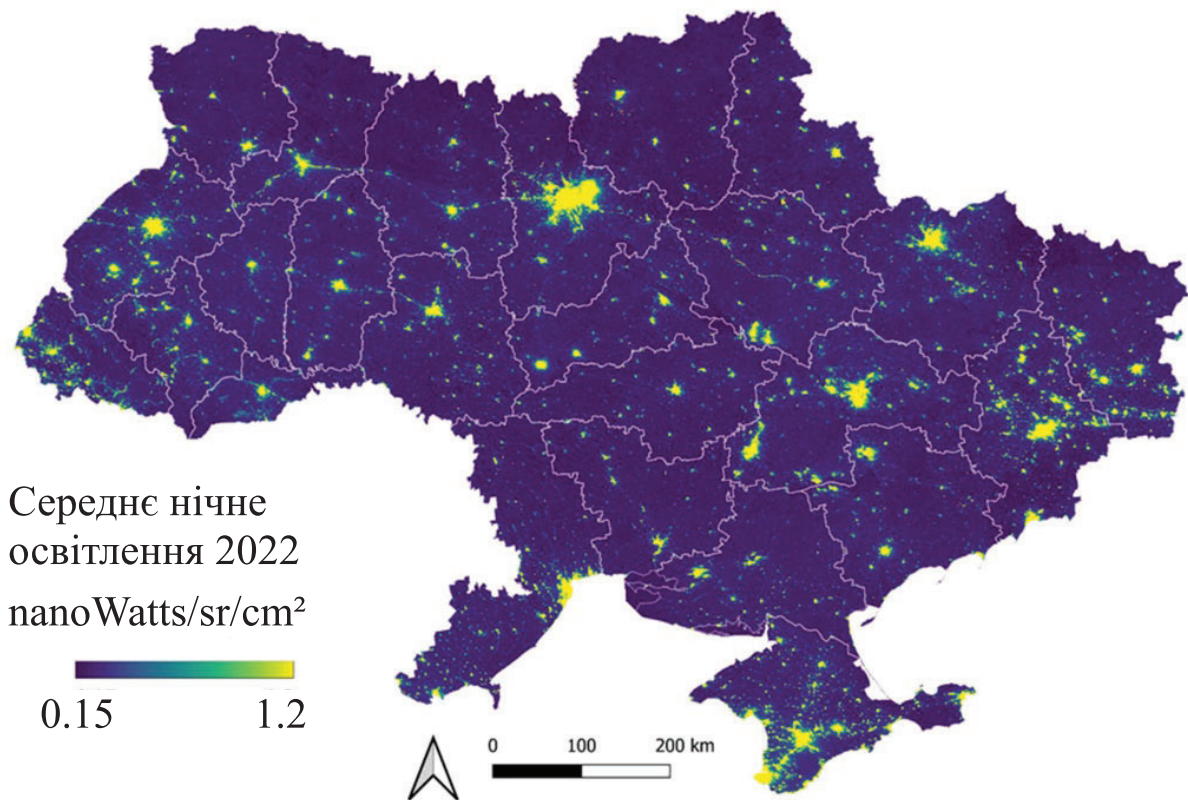


Рис. 5. Усереднені значення нічного освітлення у 2022 році

Із рис. 3 - 5 бачимо, що освітленість всіх регіонів України збільшилась за період від 2013 до 2021 року, що свідчить про підвищення економічної активності. Водночас в 2022 році спостерігається явне зниження економічної активності по всій території країни.

На рис. 6 представлено зміну освітлення в функціональних міських зонах України до повномасштабного вторгнення і після початку великої війни [10]. На діаграмі зліва порівняно рівень освітлення функціональних міських зонах України у 2013 р. та 2021 р. З наведеної діаграми бачимо, що практично в усіх функціональних міських зонах рівень освітлення в 2021 р. значно перевищує аналогічні показники 2013 р. На діаграмі справа порівняно рівень освітленості у функціональних міських зонах у 2021 та 2022 роках. Тут явно прослідковується зменшення освітленості практично в усіх міських функціональних зонах. Особливо відчутна різниця спостерігається в південних та східних областях України, що пояснюється впливом військових дій.

Як бачимо із рис. 7 в період з 2013 по 2021 р. економічна активність зростала на всій території України за винятком тимчасово окупованих частин Луганської та Донецької областей.

На основній території України спостерігається збільшення нічного освітлення на 20–100 відсотків, що свідчить про зростання економічної активності в цей період.

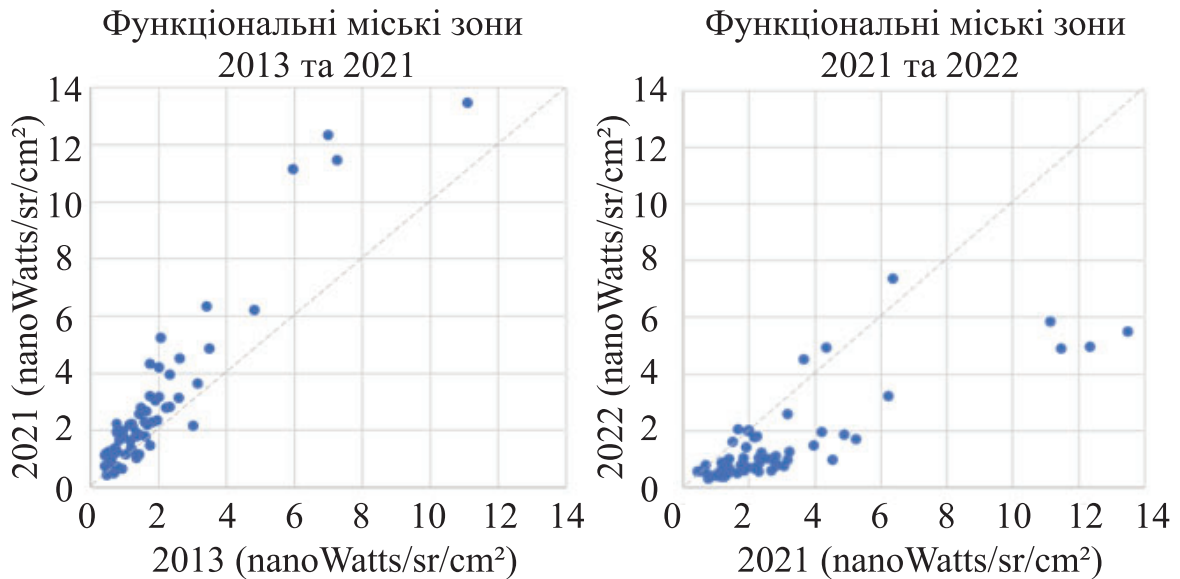


Рис. 6. Зміна освітлення в функціональних міських зонах України (2013 та 2021; 2021 та 2022)

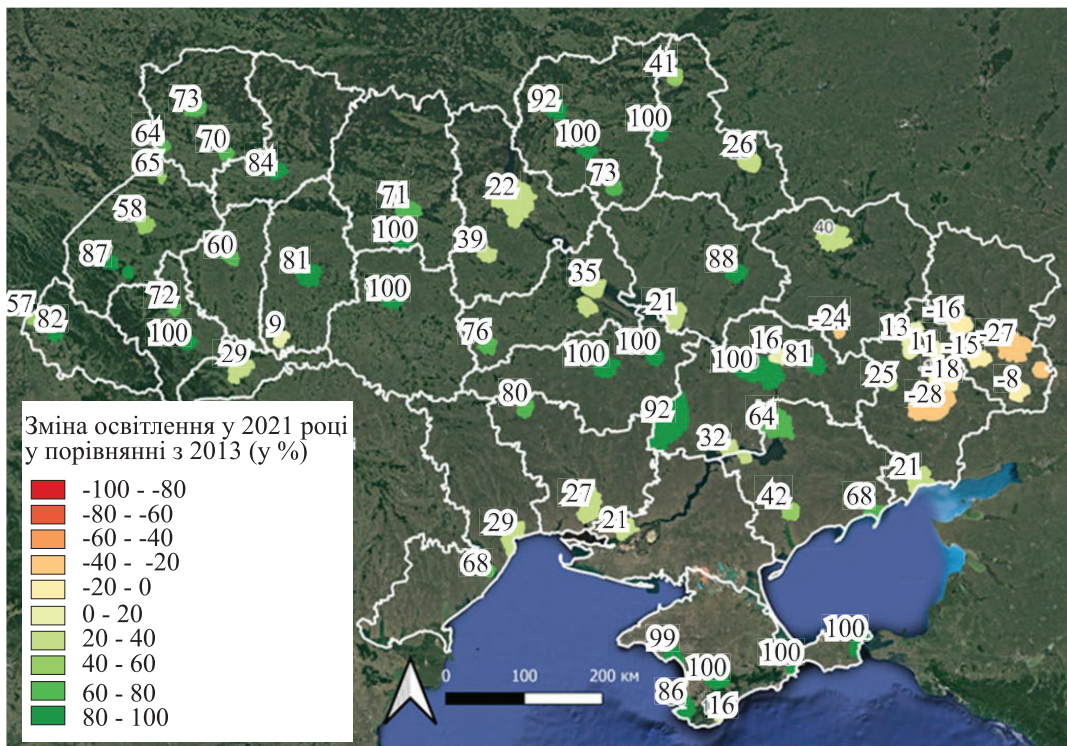


Рис. 7. Зміна освітленості у функціональних міських зонах у 2021 році у порівнянні з 2013 роком у відсотках

На тимчасово окупованих територіях спостерігається зменшення нічного освітлення функціональних міських зонах до

3.3. Аналіз індикаторів економічної діяльності на основі різномірних даних

20 відсотків у 2021 р. порівняно з 2013 р. Ця тенденція також підтверджується аналізом змін земного покриву в тимчасово окупованих областях Луганської та Донецької області [15]. В цій праці показано, що за час окупації площі оброблюваних сільськогосподарських земель на окупованих територіях зменшилися не менш ніж на 20%.

Водночас на рис. 8 явно прослідковується зменшення освітленості практично в усіх міських функціональних зонах після початку повномасштабної війни в 2022 р. Особливо відчутна різниця (до 80%) спостерігається в функціональних міських зонах, наближених до територій бойових дій в південно-східних областях України. Фактично, стабільною ситуація залишається лише на територіях, що були окуповані після 2014 р. На цих територіях погіршення спостерігалось в період з 2014 р. [16].

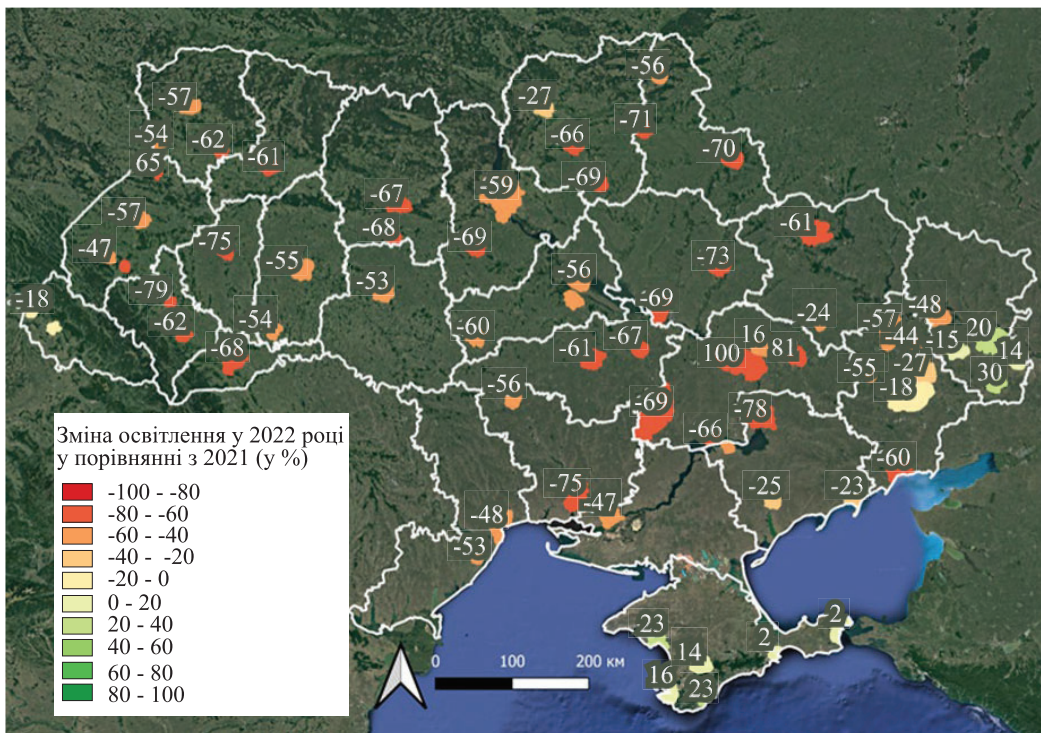


Рис. 8. Зміна освітленості у функціональних міських зонах у 2022 р. у порівнянні з 2021 р. у відсотках

Промислові галузі, які найбільше впливають на економіку країни, зазвичай є тими, які генерують значну частину валового внутрішнього продукту (ВВП) та забезпечують значну кількість робочих місць. За даними Державної статистики України найбільший свій вклад у ВВП країни вносять економічні діяльності, перші 10 з яких наведені в табл. 1.

Для прикладу візьмемо переробну промисловість, що становить 10,13 % частини ВВП, та визначимо на скільки від неї залежить ВВП, а також для яких областей України ця залежність є вищою, а для яких нижчою. Для цього обрано валовий регіональний продукт (ВРП) з державної статистики України [17], а також статистичні показники переробної промисловості (за кількістю підприємств в регіонах [18] та за обсягом переробної продукції [19]).

Для обраних показників пораховано кореляцію Пірсона для 2014–2021 р. для кожної області окремо. Отриманий результат наведено у помаранчевому стовпчику на рис. 9 (за кількістю підприємств в регіонах). Цифри над стовпчиковою діаграмою відповідають кількості підприємств в регіонах. Як бачимо з рис. 9, майже всі області мають високу кореляцію ВРП з переробною промисловістю за кількістю підприємств в регіонах, окрім Івано-Франківської, Тернопільської, а для Донецької та Луганської областей спостерігається від’ємна залежність.

Така сама кореляція була обчислена і між показником освітленості в областях та кількістю підприємств переробної промисловості (рис. 9 зелений стовпець). Як бачимо з отриманої діаграми, майже в усіх областях рівень двох обчислених кореляцій майже однаковий.

Аналогічні показники кореляцій були отримані і для обсягу переробної продукції та представлені на рис. 9. Як бачимо з наведеного рисунку, для Луганської та Донецької області зникли від’ємні кореляції, що ймовірно свідчить про наявність підприємств, які не працюють з певних причин.

Отже, порівнявши динаміку рівня освітлення по областям України з 2013 по 2022 роки (табл. 2) з переробною промисловістю, і, в свою чергу, переробну промисловість з ВРП, можна зробити висновок, що ВРП опосередковано залежить від середньорічного рівня освітленості (рис. 10).

Таким чином можна зробити висновок, що використання світлового випромінювання може виступати індикатором економічної діяльності. Зокрема, на рис. 11 наведено приклад залежності ВРП від рівня освітленості для Дніпропетровської області, що демонструє можливість будувати моделі для прогнозування річного ВРП та ВВП на рівні областей та цілої країни.

3.3. Аналіз індикаторів економічної діяльності на основі різномірних даних

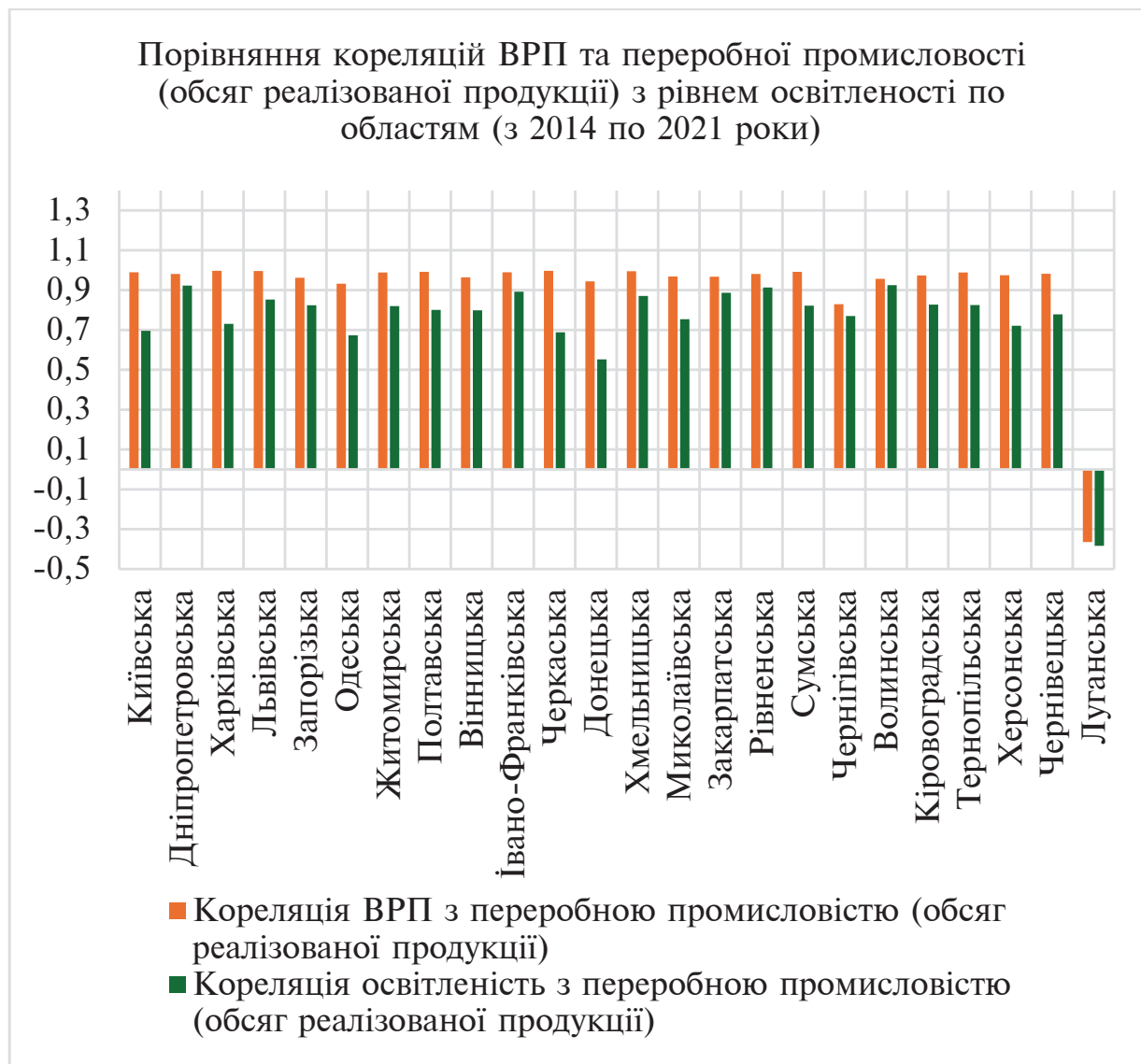


Рис. 9. Порівняння кореляцій ВРП та переробної промисловості (обсяг реалізованої продукції) з рівнем освітленості по областях (з 2014 по 2021 роки)

Таблиця 2 Зміна середньорічного показнику освітленості в розрізі областей

Освітленість (області)	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Черкаська	0,33	0,40	0,35	0,45	0,55	0,56	0,58	0,41	0,63	0,38
Чернігівська	0,16	0,16	0,15	0,13	0,26	0,23	0,27	0,21	0,31	0,24
Чернівецька	0,37	0,35	0,21	0,30	0,36	0,44	0,43	0,37	0,53	0,32
Дніпропетровська	0,41	0,51	0,38	0,47	0,66	0,67	0,68	0,61	0,83	0,41
Донецька	0,64	0,60	0,32	0,47	0,62	0,59	0,60	0,52	0,62	0,47

Частина 3. Прикладні задачі супутникового інтелекту на ...

Івано-Франківська	0,27	0,27	0,19	0,23	0,32	0,33	0,36	0,32	0,51	0,33
Харківська	0,34	0,38	0,33	0,36	0,47	0,48	0,43	0,37	0,53	0,35
Херсонська	0,19	0,20	0,14	0,14	0,30	0,24	0,30	0,29	0,33	0,31
Хмельницька	0,24	0,25	0,17	0,19	0,29	0,29	0,31	0,29	0,43	0,30
Кіровоградська	0,18	0,21	0,17	0,19	0,31	0,31	0,30	0,26	0,40	0,27
Київська	1,12	1,00	0,89	1,02	1,15	1,15	1,24	0,89	1,46	0,69
Луганська	0,31	0,29	0,17	0,21	0,35	0,31	0,32	0,27	0,34	0,36
Львівська	0,44	0,43	0,32	0,43	0,54	0,57	0,64	0,49	0,84	0,48
Миколаївська	0,23	0,27	0,19	0,21	0,36	0,32	0,37	0,32	0,42	0,27
Одеська	0,32	0,36	0,28	0,29	0,45	0,42	0,46	0,43	0,51	0,37
Полтавська	0,35	0,35	0,30	0,36	0,46	0,42	0,45	0,35	0,53	0,32
Рівненська	0,22	0,20	0,16	0,16	0,27	0,27	0,30	0,25	0,39	0,29
Сумська	0,24	0,23	0,22	0,22	0,33	0,33	0,33	0,27	0,39	0,27
Тернопільська	0,31	0,26	0,16	0,19	0,28	0,28	0,31	0,28	0,42	0,29
Вінницька	0,21	0,24	0,17	0,21	0,31	0,30	0,33	0,27	0,43	0,30
Волинська	0,20	0,17	0,15	0,14	0,25	0,24	0,27	0,23	0,36	0,28
Закарпатська	0,25	0,24	0,19	0,24	0,35	0,32	0,37	0,33	0,45	0,41
Запорізька	0,27	0,30	0,22	0,24	0,38	0,34	0,39	0,35	0,44	0,32
Житомирська	0,20	0,20	0,16	0,17	0,29	0,28	0,30	0,22	0,40	0,26

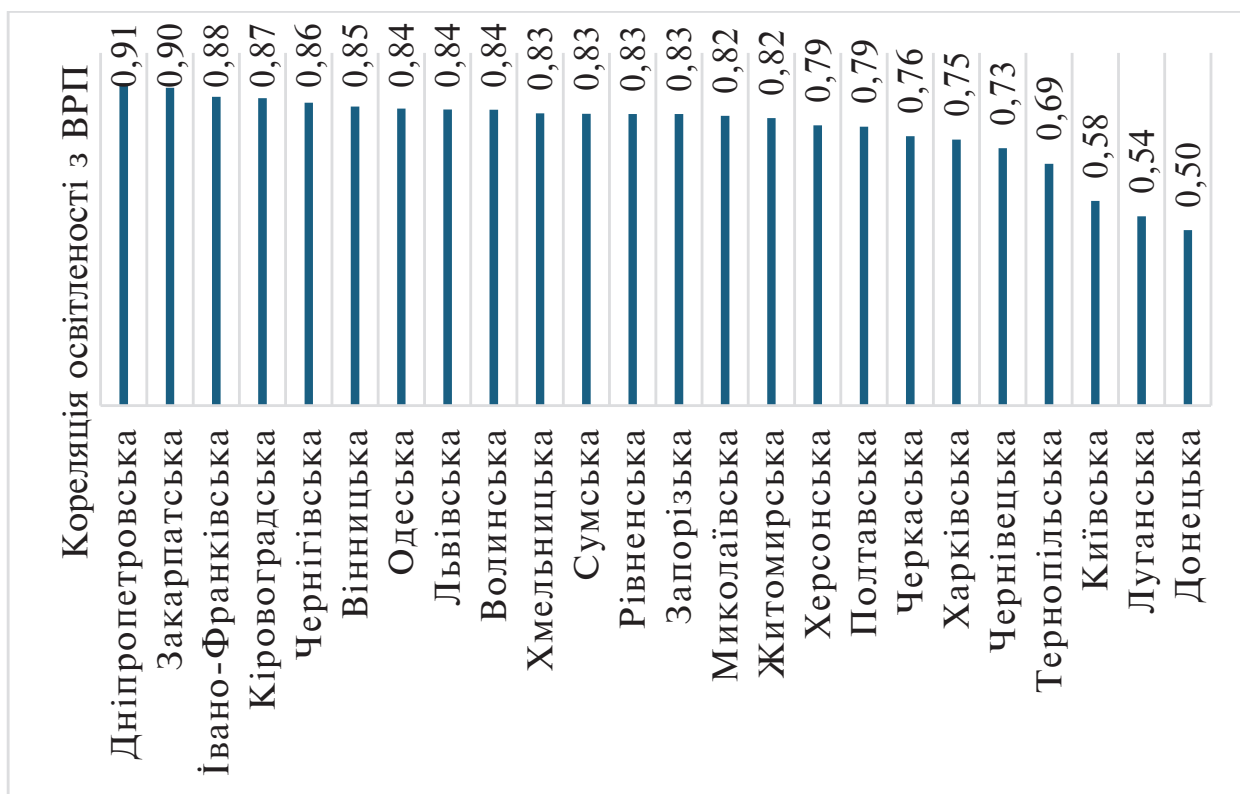


Рис. 10. Кореляція ВРП та рівня освітленості по областям України

3.3. Аналіз індикаторів економічної діяльності на основі різномірних даних

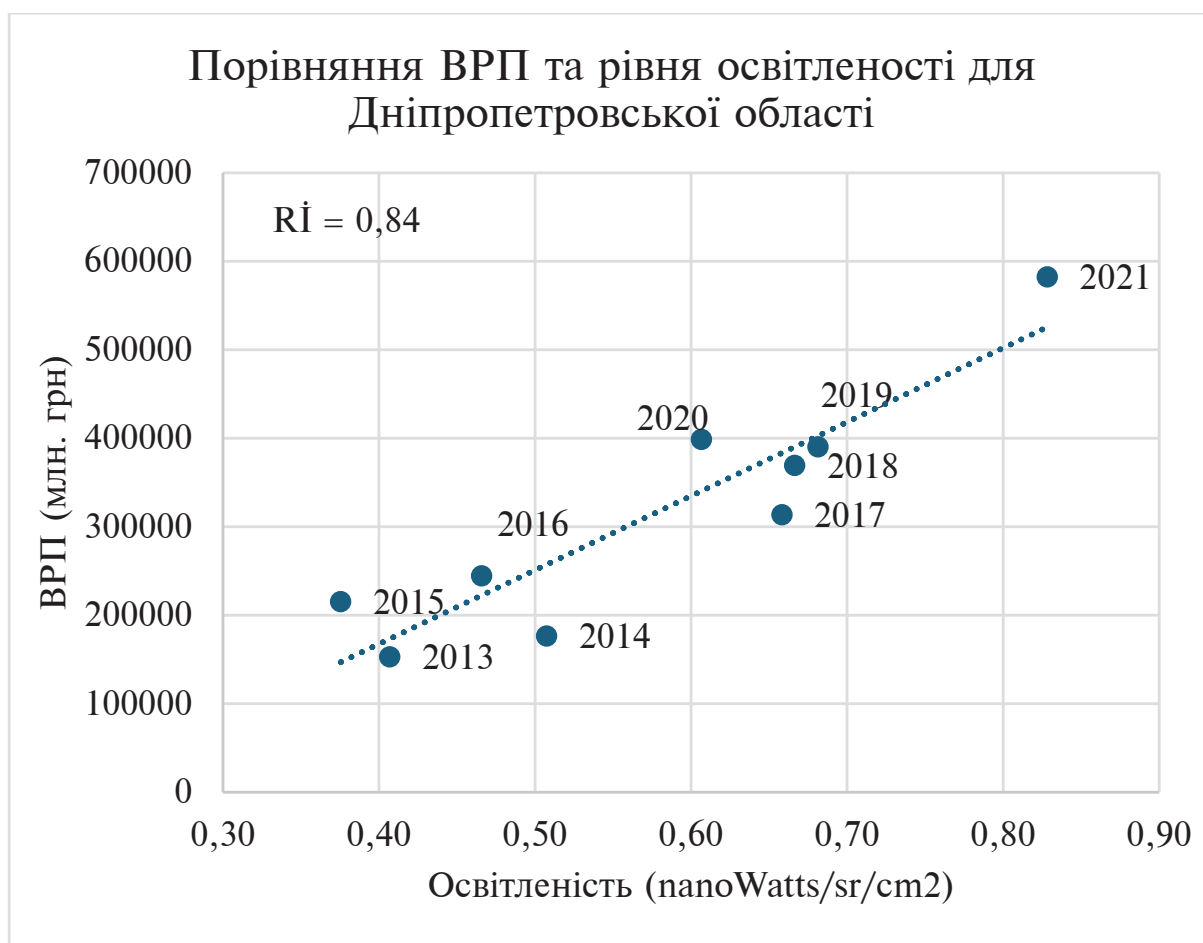


Рис. 11. Порівняння ВРП та рівня освітленості для Дніпропетровської області за 2014 – 2021

Аналогічний експеримент проведено з добувною промисловістю (рис. 12), що становить 4,54 % від ВВП України. Із рис. 12 бачимо, що в усіх областях України, де розвинена добувна промисловість, спостерігається сильна кореляція з ВРП області та рівнем освітленості. Від’ємну кореляцію спостерігаємо лише в тих областях, де видобувної промисловості практично немає.

3.1.3. МОНІТОРИНГ ЕКОНОМІЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ З ВИКОРИСТАННЯМ РІЗНОМІРНИХ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ ТА СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ ПІДВИЩЕНОГО РОЗРІЗНЕННЯ В УМОВАХ ВІЙНИ

В 2022 р. економіка України зазнала значного впливу повномасштабного вторгнення Росії, розпочатого 24 лютого 2022 р. Проте, незважаючи на воєнні дії на частині території країни, основні галузі економіки продовжують функціонувати.

Частина 3. Прикладні задачі супутникового інтелекту на ...

Вагомим сегментом економіки залишається аграрний сектор, оскільки вирощування зернових, технічних культур [20] та виробництво м'ясо-молочної продукції триває навіть в умовах війни. В цьому підрозділі наведено аналіз деяких індикаторів розвитку агросектору в умовах війни.

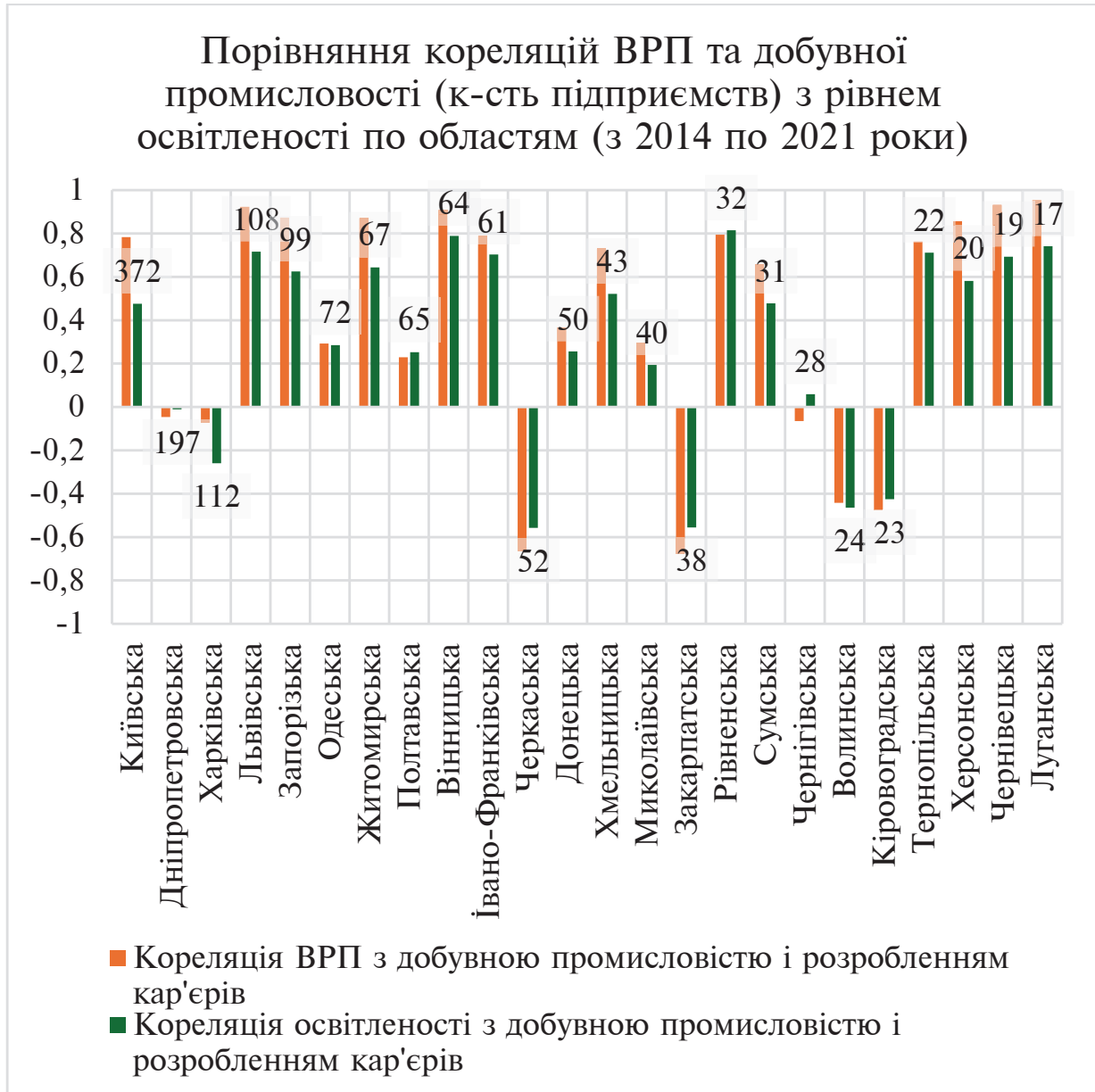


Рис. 12. Порівняння кореляцій ВРП та добувної промисловості (кількість підприємств) з рівнем освітленості по областях (з 2014 по 2021 р.)

В умовах війни зростає роль моніторингу економічної діяльності та аграрного сектору за допомогою непрямих ознак з використанням геопросторових та супутникових даних. Через активні бойові дії на частині території України та загальну

3.3. Аналіз індикаторів економічної діяльності на основі різномірних даних

дезорганізацію роботи установ традиційні методи збору та аналізу статистичних даних є ускладненими. В таких умовах вкрай необхідним є використання альтернативних джерел інформації, зокрема супутникових даних.

Завдяки супутниковим знімкам Sentinel можна отримати цінні непрямі індикатори стану аграрного виробництва – площі посівів, стан рослинності тощо. Інтеграція цих даних з іншою геопросторовою інформацією дозволяє оперативно оцінювати вплив війни на сільське господарство регіонів та аграрний сектор в цілому [21]. Супутниковий моніторинг дозволяє забезпечити своєчасне та точне відстеження змін в економічних паттернах, особливо в умовах, коли традиційні методи можуть бути обмежені через недоступність територій чи військові дії [22, 23]. Це допомагає уряду та міжнародним організаціям виявляти і відстежувати тенденції економічного розвитку, оцінювати вплив природних чи антропогенних подій на аграрний сектор та оперативно реагувати на надзвичайні ситуації. Інтеграція таких даних дозволяє підвищити прозорість та забезпечити більш ефективно планування та використання ресурсів [24].

В даному підрозділі проаналізовано вплив війни в Україні, розпочатої Росією у лютому 2022 р., на сільськогосподарське виробництво в Україні. Основні результати моніторингу економічної діяльності в аграрному секторі за супутниковими даними описано в праці [25]. Використовуючи дані за 2019-2022 р. по 10 125 сільських радах України, оцінено вплив війни на площі та очікувані врожаї озимих культур (пшениця, ячмінь, жито і ріпак) на рівні окремих полів та агреговано результати на рівні сільрад. Для виявлення пошкоджень полів внаслідок бойових дій використано супутникові знімки Sentinel-2 та Planet, класифікація типів сільськогосподарських культур здійснюється за допомогою методів машинного навчання [26, 27, 28, 29] у хмарних платформах [30, 31], а в якості предиктора врожайності використовується вегетаційний індекс NDVI [32].

За отриманими оцінками площа полів, що зазнали прямих пошкоджень внаслідок бойових дій в 2022-2023 рр., становить близько 1,5 млн га. Зменшення площі посівів в 2022 р. становить близько 10% від посівних площ 2021 р., а в 2023 – близько 15% чи 4.5 млн га (рис. 13).

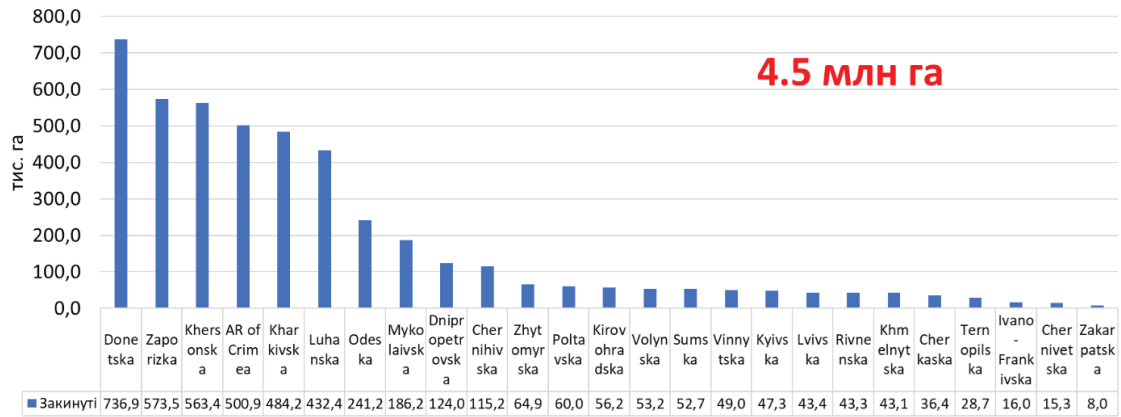


Рис. 13. Площі закинутих сільськогосподарських земель у 2023 р. (в порівнянні з 2021 р.)

Зменшення площі посівів призводить до зменшення обсягів виробництва сільськогосподарської продукції. Це може вплинути на доступність продуктів харчування на внутрішньому ринку, призводячи до зростання цін та зменшення конкурентоспроможності сільськогосподарських виробників. Сільськогосподарські підприємства, які втратили свої поля через бойові дії, можуть зазнати серйозних фінансових втрат. Вони можуть стикатися із зниженням доходів, збитками віднесеними до знищених посівів і взагалі зменшенням економічної стійкості.

Використання супутникових даних для картографування земного покриття та моніторингу сільськогосподарських посівів може значно полегшити вивчення економічної ситуації країни в умовах воєнного конфлікту, а також сприяти розробці ефективних стратегій для відновлення та розвитку сільського господарства [33].

Окрім супутникових даних важливим елементом є дані наземних досліджень, які використовуються для навчання та валідації моделі. З врахуванням обставин в Україні варто зазначити, що маршрути збору наземних даних поступово скорочуються та охоплюють менші території країни. Наприклад, якщо у 2021 р. довжина маршруту становила приблизно 6500 км, то у 2023 р. ця величина скоротилась до близько 4018 км (рис. 14).

3.3. Аналіз індикаторів економічної діяльності на основі різномірних даних

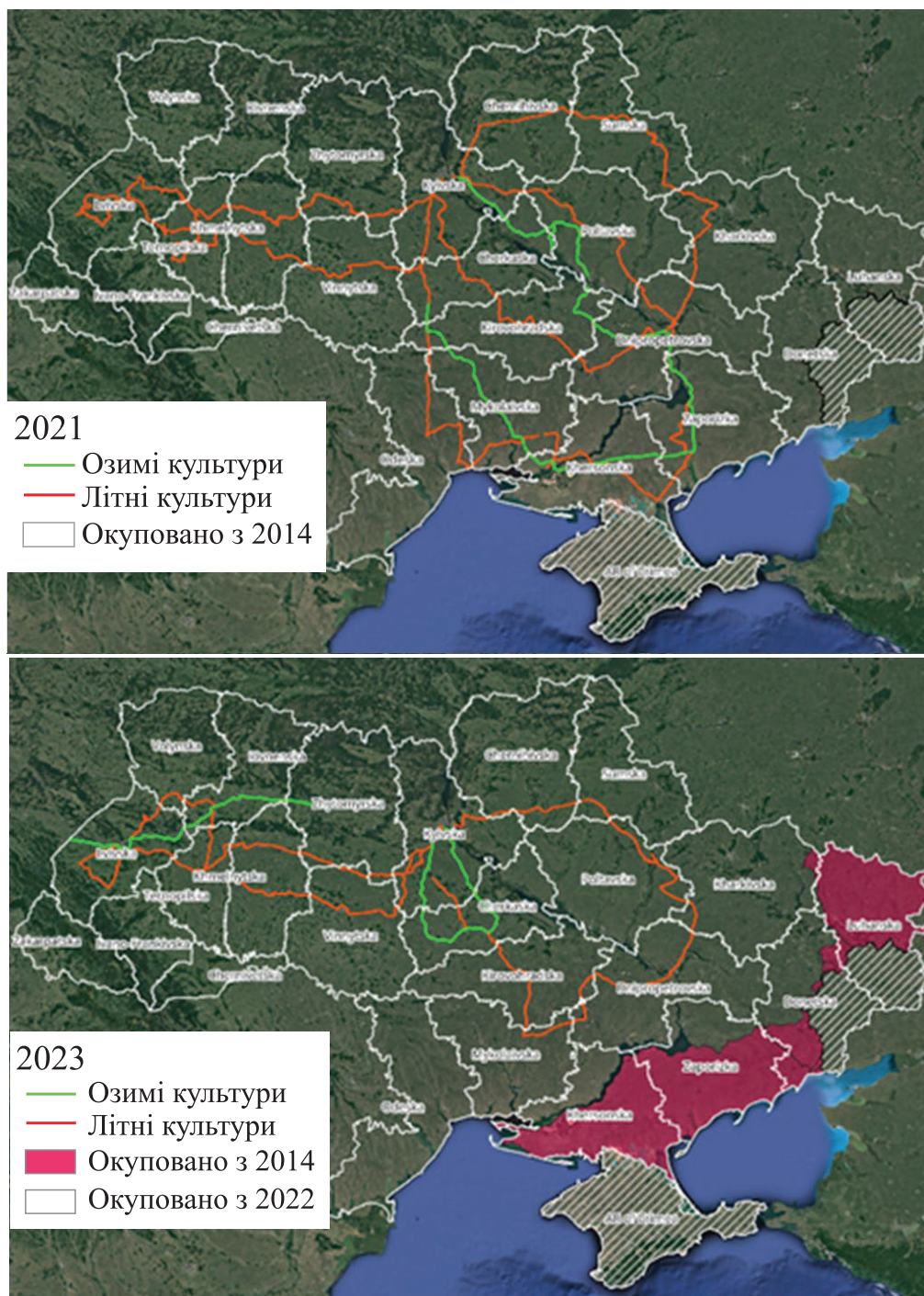


Рис. 14. Маршрути збору наземних даних у 2021 та 2023 р.

Таким чином, набуває важливості постійне вдосконалення методів та моделей для їх навчання та успішного застосування на різних територіях при умові обмеженості навчальних даних.

У 2023 р. карта класифікації земного покриття забезпечує можливість відстеження не лише земель сільськогосподарського призначення, але й територій, які стали закинутими і перестали

оброблятися на сході та півдні України (рис. 15), що у свою чергу має вплив на економічну діяльність країни.

Зазвичай для валідації карт класифікації посівів культур використовуються дані офіційної статистики. Проте в сучасних умовах, у деяких областях такі дані відсутні. Тому супутникові дані стають єдиним можливим джерелом для оцінки посівних площ в умовах відсутності повноцінної статистики (рис. 16).

В ситуаціях, коли офіційна статистика виявляється недостатньою або відсутньою, супутникові дані стають невід'ємним інструментом для оцінки та моніторингу площ, що має важливе значення для економічної діяльності.

Створені карти озимих зернових для сільських рад на основі вегетаційних індексів вказують на найбільші концентрації озимих зернових на півдні та сході країни, а також на зменшення їхніх площ у 2022 році та, в певній мірі, у 2020 році, порівняно із 2021 та 2019 рр. (рис. 17).

Оцінений на основі даних NDVI спад врожаю пшениці в 2022 р. становить 1,9 млн. тон. В цілому втрати виробництва озимої пшениці через прямі та непрямі наслідки війни в 2022 р. становлять до 4,84 млн тон або 17% потенційного врожаю [25].

На рис. 18 проілюстрований розподіл агрегованих в межах сільських громад значень NDVI для різних періодів років. Для всіх років, крім 2021, пікові значення NDVI досягаються в перші 10 днів червня (синій: 1 - 11 травня; червоний: 12-21 травня; зелений: травень 22 - 31; помаранчевий: 1 - 11 червня). Щоб порівняти NDVI за роками на різних стадіях росту, на рис. 19 представлені NDVI на полях з озимими зерновими 11 травня, 21 травня, 31 травня та 11 червня, що дозволяє зробити аналогічний висновок.

Отримані результати демонструють, що NDVI у 2022 році був нижчим, ніж у попередні роки (синій - 2019; червоний - 2020; зелений - 2021; помаранчевий - 2022).

Найбільше постраждали дрібні фермерські господарства. Для цього були виділені субсидії для фермерів. Із використанням побудованих карт та меж полігонів із кадастру можна визначити, чи були оброблені фермерські землі (рис. 20). Таким чином можна контролювати ефективність використання виділених коштів на субсидіювання.

3.3. Аналіз індикаторів економічної діяльності на основі різномірних даних

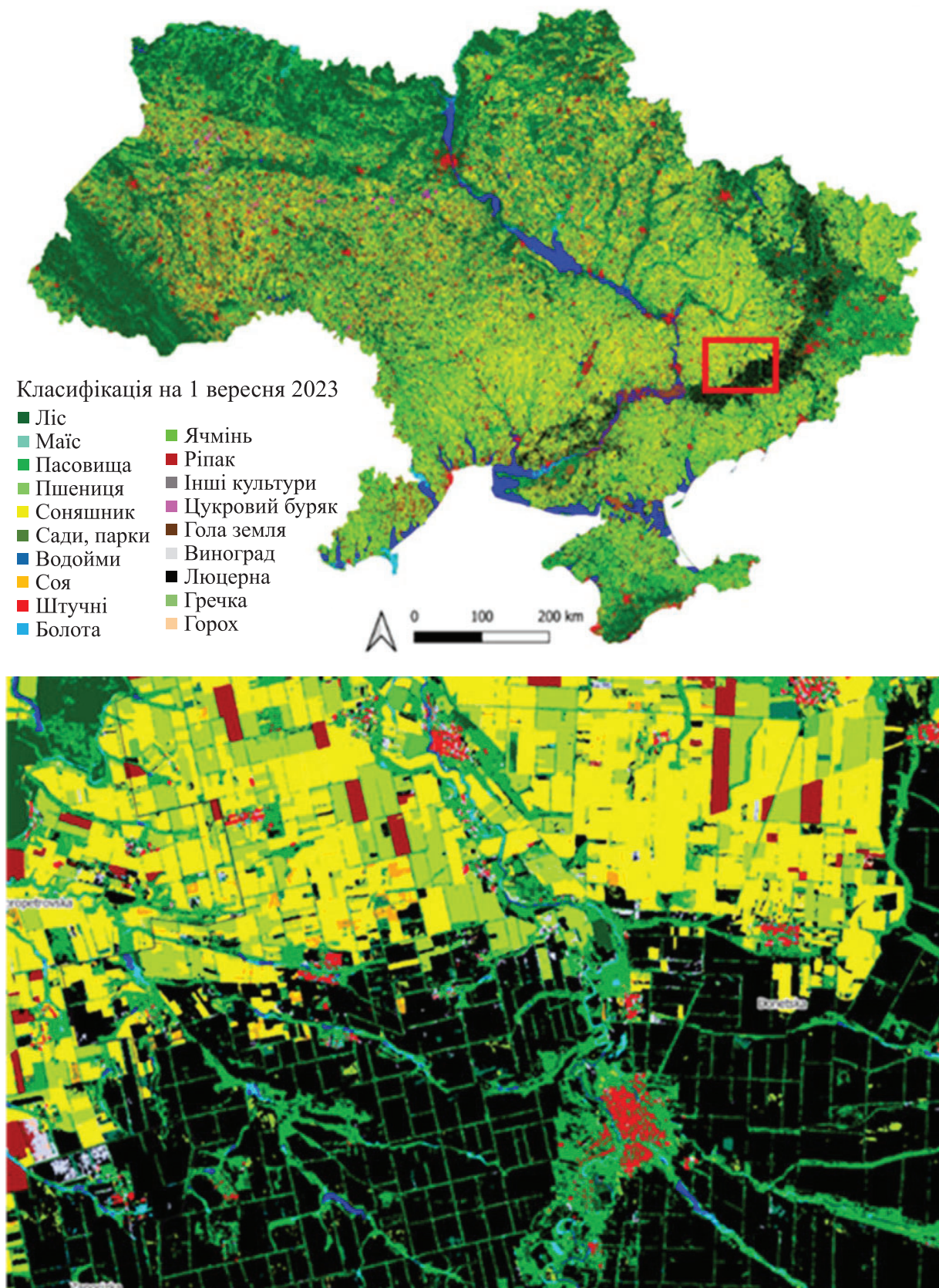


Рис. 15. Карта класифікації земного покриву для території України в 2023 р.

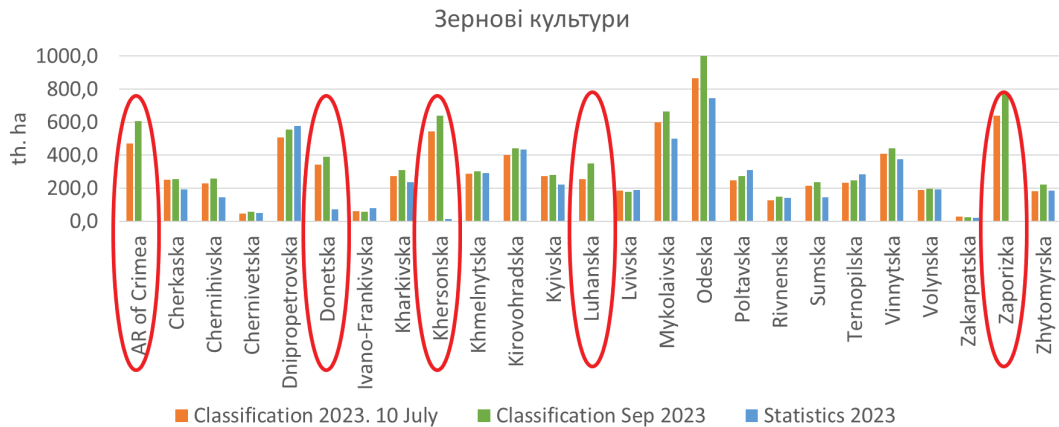


Рис. 16. Оцінка посівних площ за супутниковими даними в умовах відсутності повноцінної статистики (2023)

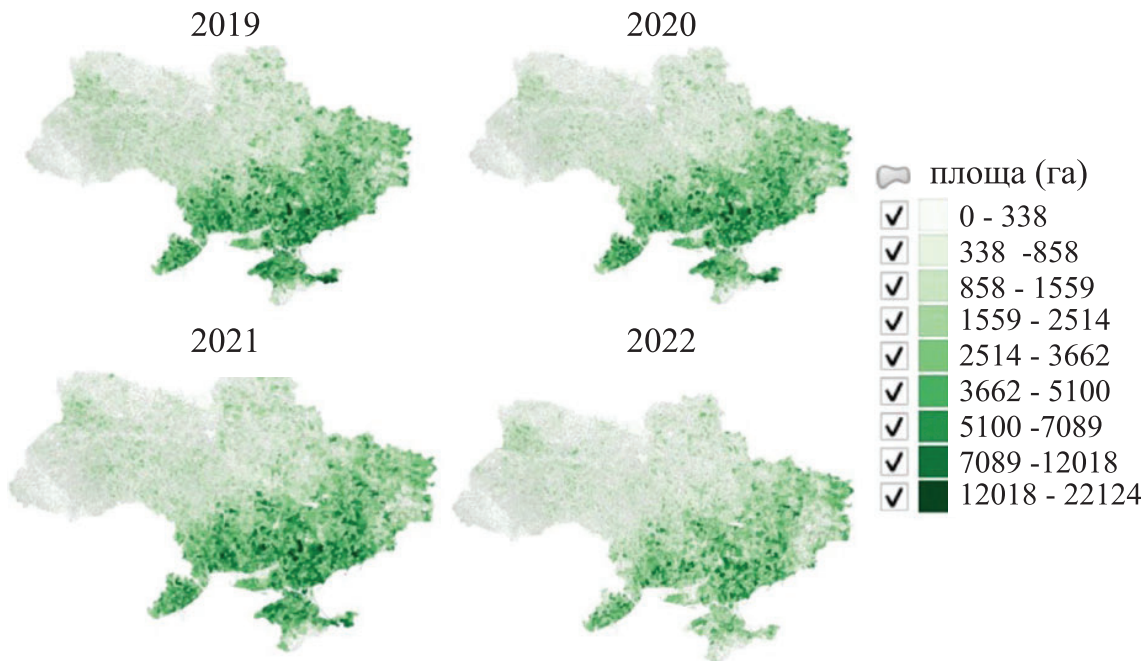


Рис. 17. Карта озимих культур за вегетаційні періоди 2019–2022 рр.

Отже, використання супутникових даних дозволило кількісно оцінити вплив війни на сільське господарство України. Це важливо для прийняття обґрунтованих рішень з підтримки аграрного сектору та забезпечення продовольчої безпеки, оскільки супутникова інформація часто є єдиним достовірним джерелом даних про пошкоджені землі сільськогосподарського призначення (рис. 21) і про площі окупованих сільськогосподарських земель.

3.3. Аналіз індикаторів економічної діяльності на основі різномірних даних

Площа окупованих сільськогосподарських земель у 2022 р. становила 5.7 млн га (табл. 3).

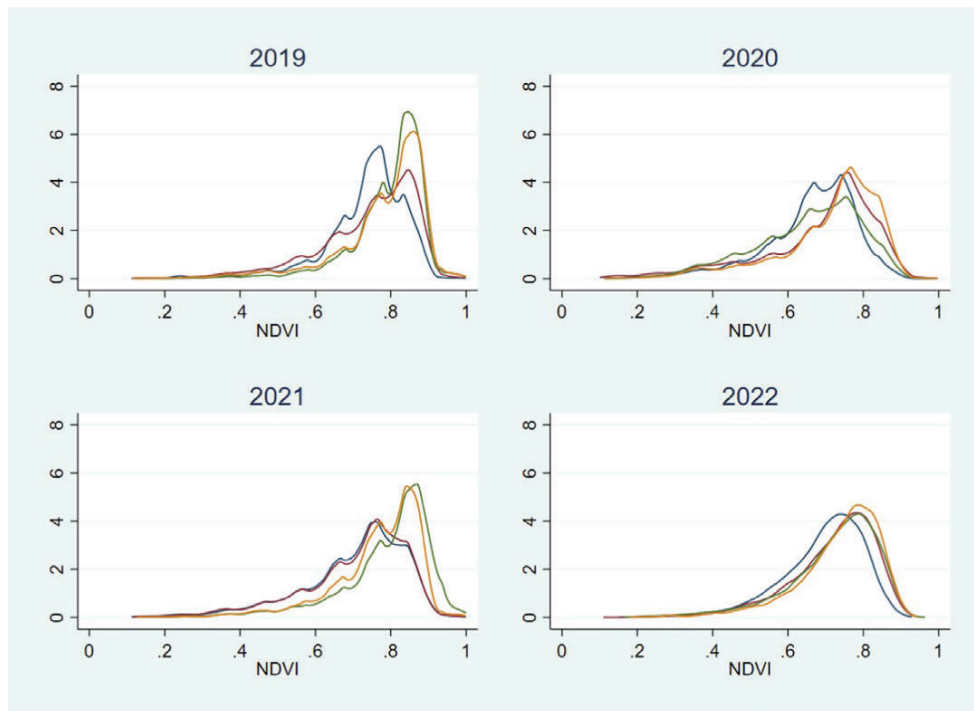


Рис. 18. Розподіл NDVI для полів озимих зернових за різні часові періоди, 2019 - 2022 рр.

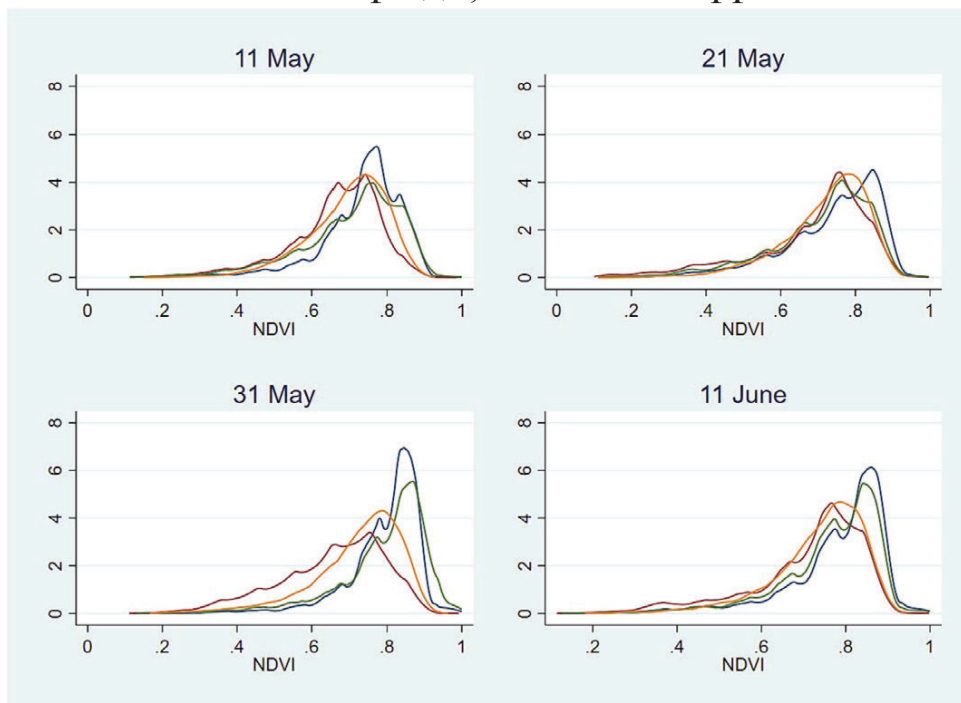


Рис. 19. Розподіл NDVI для полів озимих, вирощених під озимі зернові культури в різні дати протягом вегетаційного періоду, 2019 – 2022рр.



Рис. 20. Моніторинг земель окремих фермерів

Загальна площа безпосередньо пошкодженої території становить 1,4 млн га (станом на 10 вересня 2023 р.).

Розроблені інформаційні технології [34] дозволяють обчислювати такі економічні індикатори розвитку аграрного сектору щорічно.

Ці результати передаються в Світовий банк та Мінагрополітики, де використовуються для аналізу ефективності державних та міжнародних програм.

Таблиця 3 Площі окупованих сільськогосподарських земель в 2022 році

млн. га	Окуповані з 2014	Окуповані з 24 лют. 2022	Не окуповані	Загалом млн га
С.г.	1,73 (5.6%)	5,70 (18.3%)	23,58 (76.1%)	31,00
Озимі 2022	0,59 (6.6%)	2,05 (22.9%)	6,33 (70.5%)	8,97

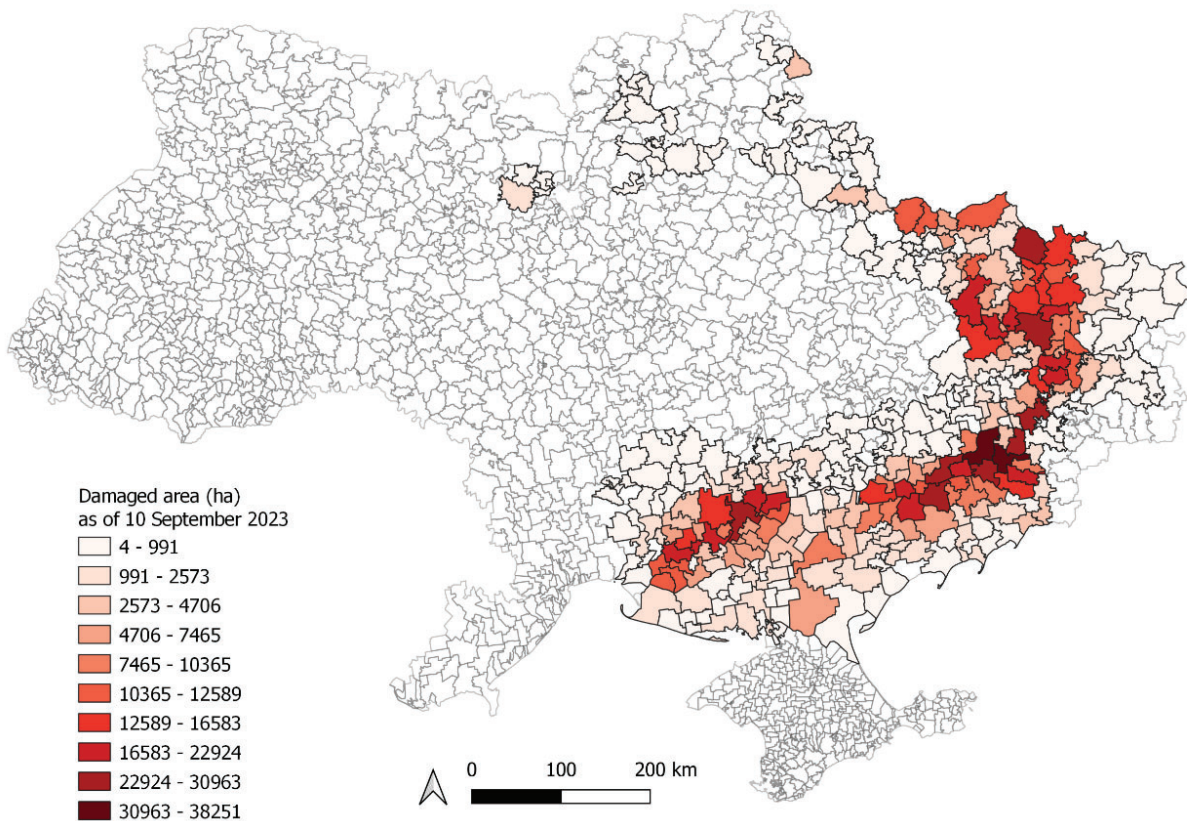


Рис. 21. Пошкоджені землі сільського призначення протягом війни станом на 10 вересня 2023 р.

3.1.4. МОНІТОРИНГ ПОШКОДЖЕНЬ ПОЛІВ З ВИКОРИСТАННЯМ РІЗНОМІРНИХ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ ТА СУПУТНИКОВИХ ДАНИХ ПІДВИЩЕНОГО РОЗРІЗНЕННЯ В УМОВАХ ВІЙНИ

Збройна агресія в Україні має глибокий негативний вплив на сільське господарство, суттєво погіршивши ситуацію в аграрному секторі. Внаслідок військових дій пошкоджено тисячі гектарів сільськогосподарських полів, що призвело до зниження врожайності озимої пшениці у 2022 р. на 17% [35]. Це величезна втрата для української економіки, враховуючи, що до війни Україна була одним із найбільших у світі експортерів зерна та іншої рослинницької та сільськогосподарської продукції. Для відновлення благополуччя в аграрному секторі важливим завданням є пошук і відстеження динаміки розвитку пошкоджень на полях. Супутникові дані, особливо з дуже високим просторовим розрізненням (VHR), корисні для цього завдання. Таким чином, завдяки аналізу супутникових даних можна визначити

пошкодження посівів через град, мороз [36] або посуху [37], інші стихійні лиха [38] і т.д.

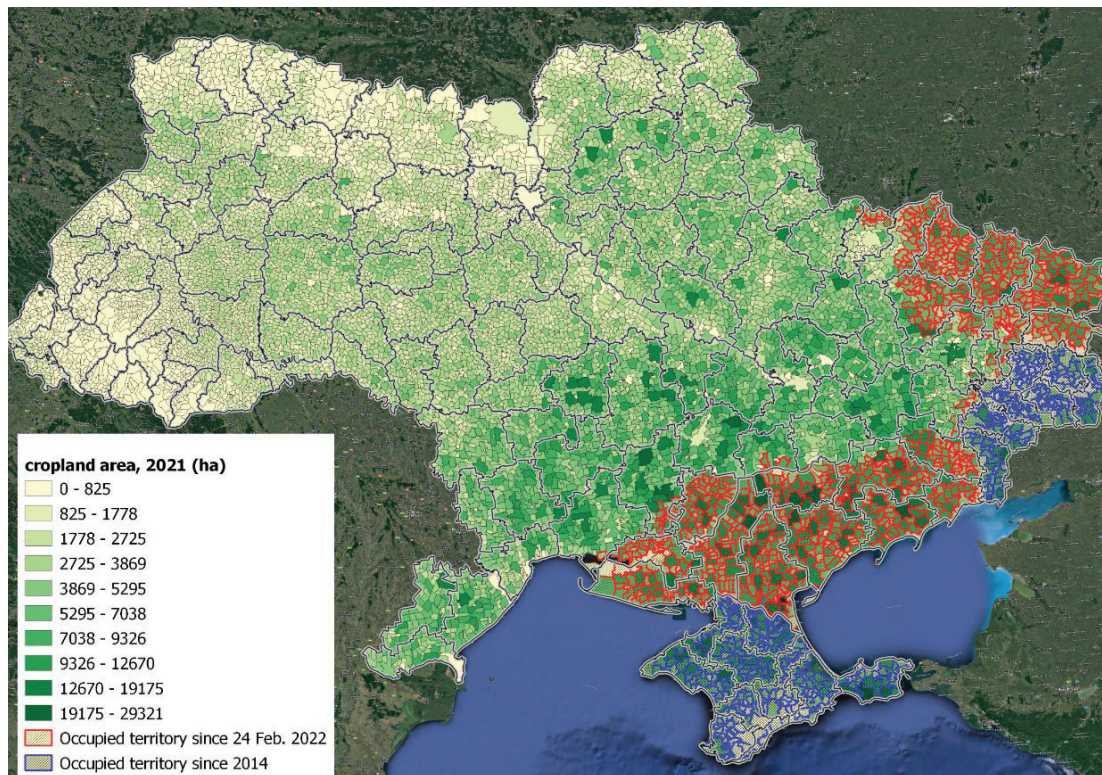


Рис. 22. Площі окупованих сільськогосподарських земель в 2022 р.

В [39] супутникові дані VHR використано для виявлення та картографування пошкоджень сільськогосподарських полів через наявність кратерів від артилерійських снарядів. Автори використали супутникові зображення високого просторового розрізнення WorldView-2 і глибоке машинне навчання, щоб визначити пошкодження в районі Донецької області площею близько 858 км², яка є зоною активного конфлікту з 2014 р. У процесі досліджень було виявлено понад 22 000 кратерів, утворених на сільськогосподарських полях на цій території. Однак супутникові дані VHR зазвичай знаходяться в комерційному доступі та рідко публікуються відкрито, часто обмежуючись невеликими зразками для зон обмеженого доступу. Це створює проблему для вивчення великих територій і тривалих періодів. Тим не менш, дослідницькі організації та університети можуть отримати певні супутникові зображення VHR для своїх досліджень безкоштовно. Наприклад, Planet Labs пропонує університетським дослідникам безкоштовний доступ до даних супутника PlanetScore

3.3. Аналіз індикаторів економічної діяльності на основі різномірних даних

із просторовим розрізненням 3 м, хоча й з деякими обмеженнями щодо кількості завантажень зображень на місяць.

З іншого боку, для дослідження завданої війною шкоди сільськогосподарським полям також можна використовувати безкоштовні дані з нижчим просторовим розрізненням [21]. Наприклад, на основі аналізу нормалізованого вегетаційного індексу (NDVI) або виявлення аномалій у спектральних каналах із супутникових знімків Sentinel-2 із розрізненням 10 м можна ідентифікувати великі воронки, сліди руху військової техніки і пожежі на полях [40], [41].

Для досягнення синергетичного ефекту можна поєднати характеристики просторового розрізнення VHR і тимчасового просторового розрізнення з супутникових даних середнього розрізнення. Такий підхід дозволяє розширити територію для пошуку пошкоджень та дослідити історію їх виникнення. Використовуючи дані на вищих часових частотах, наприклад Sentinel-2 (3-5 днів) або щоденний PlanetScore, можна визначити приблизну дату появи кратера. Відстежуючи подальші зміни пошкоджень, можна оцінити довгостроковий вплив кратерів або вигорілих ділянок і те, як швидко поля відновлюються після пошкоджень. Крім того, важливо визначити, які пошкодження залишаються видимими навіть через тривалий період.

Запропонований підхід полягає в поєднанні комерційних супутникових даних SkySat і PlanetScore з безкоштовними даними Sentinel-2 для реконструкції історії збитків і аналізу їх динаміки. Крім того, порівнюються результати виявлення кратерів, отримані за допомогою машинного навчання та аналізу зображень SkySat, з результатами виявлення аномалій на даних Sentinel-2 і PlanetScore. За допомогою цього підходу ми прагнемо перевірити релевантність результатів виявлення кратерів на полях, використовуючи дані з нижчим просторовим розрізненням (3- і 10-м), порівнюючи їх з результатами, отриманими з даних з вищим просторовим розрізненням (<1 м). Це дозволить оцінити застосовність даних з нижчим просторовим розрізненням для виявлення пошкоджень на сільськогосподарських полях. Крім того, таким чином можна оцінити можливість розширення зони пошуку збитків та збільшення площі земель, що входять до аналізу. Це дозволить краще зрозуміти масштаб збитків та їх

наслідки, а також спрямувати зусилля на ефективне відновлення сільського господарства після військових дій.

3.1.5. ВИКОРИСТАНІ ДАНІ

Для проведення дослідження можливості поєднання даних із дуже високим просторовим розрізненням та вільно доступних супутникових даних для виявлення пошкоджень на сільськогосподарських полях були використали зображення з трьох різних джерел супутникових даних з різним просторовим та часовим розрізненням, а саме:

1. SkySat — група з 21 супутника спостереження Землі, що належить Planet Labs, забезпечує високе просторове розрізнення (0.5 м) [42].

2. PlanetScope: група з приблизно 130 супутників, здатних щоденно знімати всю поверхню Землі (щоденне покриття 200 мільйонів км²) з просторовим розрізненням приблизно 3 м, також керується компанією Planet [43].

3. Sentinel-2: місія Copernicus, що складається з двох ідентичних супутників, оснащених 13 спектральними каналами, що забезпечують просторове розрізнення до 10 м і часове розрізнення 3-5 днів [44].

Незважаючи на дуже високе просторове розрізнення і щоденне оновлення даних SkySat і PlanetScope, їх основним обмеженням є вартість, яка обмежує охоплення великих територій і можливість аналізу довгострокових часових рядів. Однак, незважаючи на нижче просторове розрізнення і менш часте оновлення, супутникові дані Sentinel-2 мають значну перевагу — вони відкриті та безкоштовні. Це дозволяє проводити дослідження на величезних територіях і відстежувати довгострокові часові ряди.

Для дослідження була обрана територія на межі Донецької та Луганської областей, де тривають активні бойові дії (рис. 23).

Для досліджень були використані зображення SkySat за 2 липня 2022 р., яке охоплює вказану область (рис. 24-б). Зображення охоплює площу 8836 га і включає близько 370 сільськогосподарських полів, які були ідентифіковані за допомогою ділянок, наданих компанією Sinergise в рамках ініціативи EO4UA [45] (рис. 24-а). Що стосується супутника Sentinel-2, то для цього регіону також доступне зображення за цю

3.3. Аналіз індикаторів економічної діяльності на основі різномірних даних

ж дату (2 липня 2022 р.) (рис. 24). Зображення PlanetScore були відсутні через велику хмарність. Тому для проведення експерименту було використано найближче доступне безхмарне зображення PlanetScore за 6 липня 2022 р. (рис. 24).

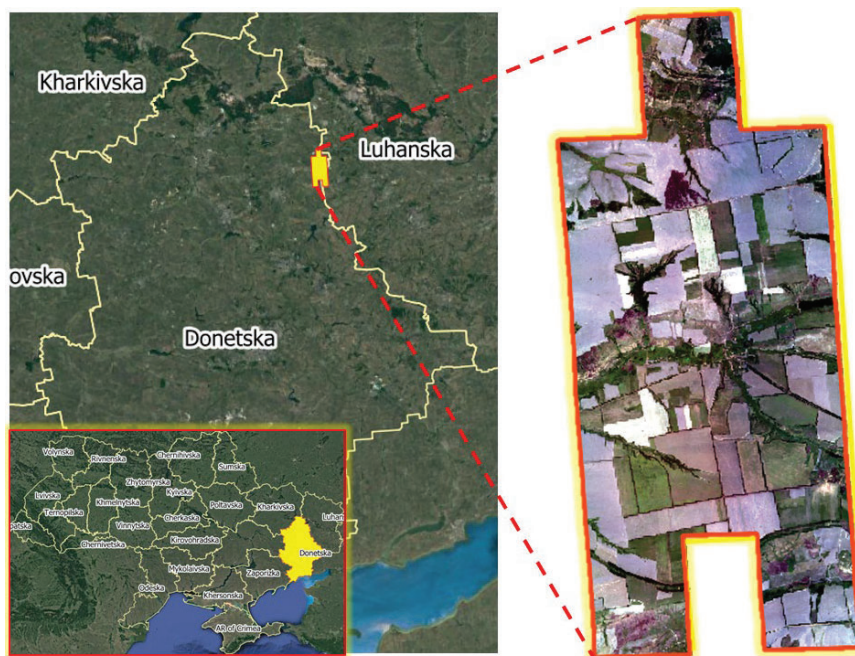


Рис. 23. Досліджувана територія

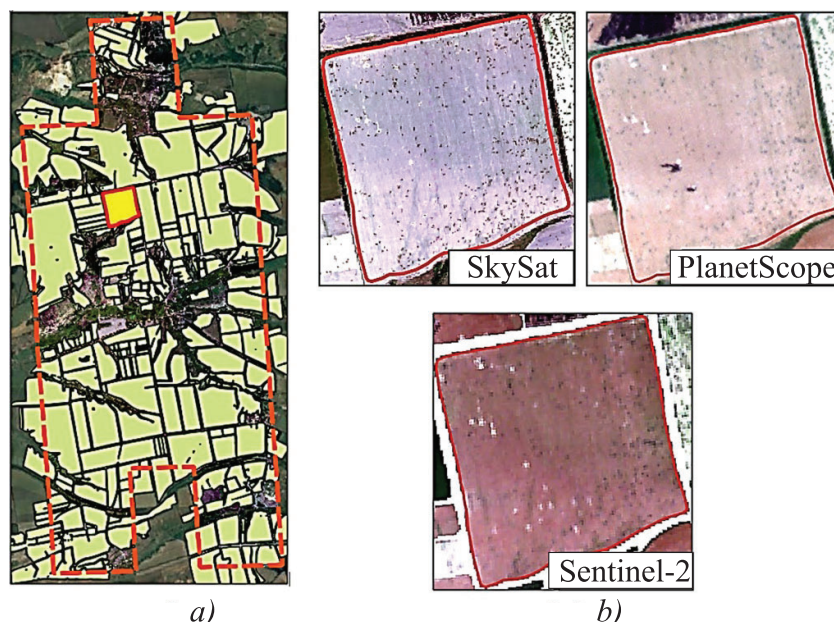


Рис. 24. а) Польові ділянки, розташовані на території інтересу. б) огляд одного з полів на зображеннях із трьох супутників у комбінації натуральних кольорів (RGB)

Крім самого супутникового зображення SkySat були також використані векторні дані з раніше визначеними векторними межами 18 888 кратерів на сільськогосподарських полях (рис. 25) [38].

Були завантажені щоденні дані PlanetScore та 5-денні дані Sentinel-2 за період з березня по липень 2022 р. Використовуючи ці набори даних із меншим просторовим розрізненням, але вищим у часі, можна визначити дати появи кратерів, які добре бачимо на супутникових знімках SkySat високого просторового розрізнення. Крім того, цей підхід дозволяє нам відстежувати зміни в часі цих кратерів.

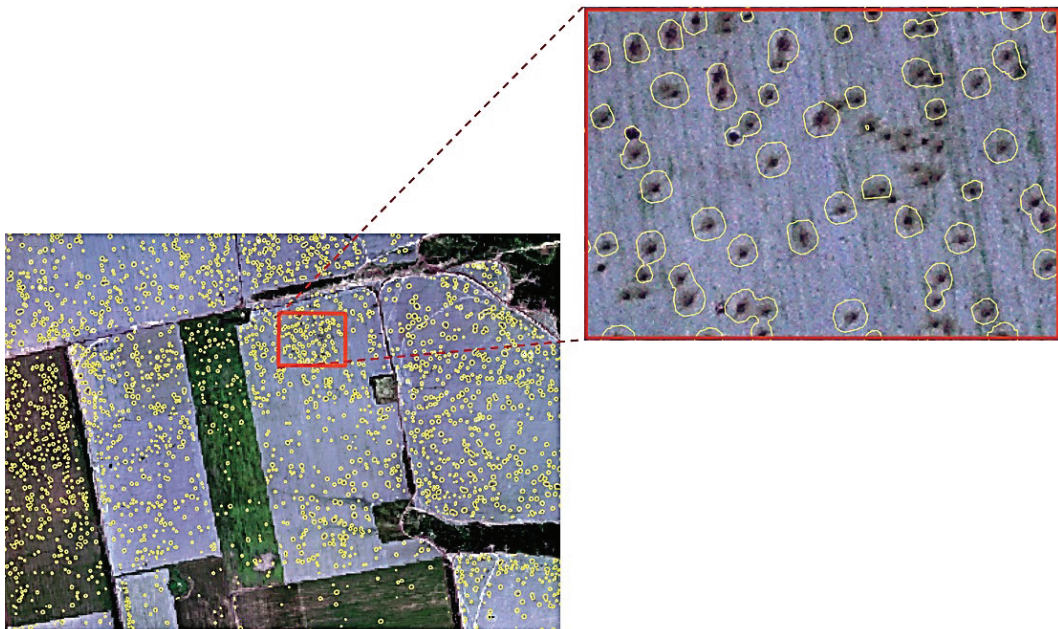


Рис. 25. Виявлені кратери за допомогою даних SkySat

3.1.6. МЕТОДОЛОГІЯ ПОРІВНЯННЯ ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ РІЗНОГО ПРОСТОРОВОГО РОЗРІЗНЕННЯ

Для визначення збитків за допомогою відкритих даних Sentinel-2 і комерційних даних PlanetScore була застосована методологія [39, 40] заснована на виявленні аномалій на основі комбінації синього та зеленого спектральних каналів. Для виявлення аномалій до розгляду був також включений нормалізований індекс води NDWI. Він пов'язаний із вмістом вологи та базується на відносних відмінностях між зеленим (Green) і ближнім інфрачервоним (NIR) каналами (1).

3.3. Аналіз індикаторів економічної діяльності на основі різномірних даних

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \quad (1)$$

Індекс NDWI дозволяє визначити наявність заболочених і посушливих територій. Було зроблено припущення, що у разі пошкодження рельєфу місцевості, спричиненого вибухом або снарядом, рівень вологи може змінюватися або вгору (через руйнування ґрунту, що призводить до висхідного руху вологого ґрунту), або вниз (у разі пожеж і висохлих воронки) в залежності від виду пошкодження. Індекс NDWI чутливий до таких змін.

Для ідентифікації пошкоджень за допомогою спектральних каналів були використані зелений канал (2) для ідентифікації кратерів чорного кольору (що вказує на потенційно щойно пошкоджений ґрунт через вибух), а синій канал (3) – для білих кратерів (вказують на потенційно сухий ґрунт):

$$Green_{dam} = \begin{cases} 1, & \text{if } Green_{mean} - Green > 0.5 * Green_{stdDev}, \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

де $Green_{dam}$ — це виявлені пошкоджені пікселі, $Green_{mean}$ — середні значення зеленого каналу в межах поля, $Green_{stdDev}$ — стандартне відхилення в межах поля

$$Blue_{dam} = \begin{cases} 1, & \text{if } Blue_{mean} - Blue < -1.5 * Blue_{stdDev}, \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

де $Blue_{dam}$ — виявлені пошкоджені пікселі, $Blue_{mean}$ — середні значення синьої смуги в полі, $Blue_{stdDev}$ — стандартне відхилення в межах поля.

При пошуку аномалій за допомогою вегетаційного індексу NDWI використано підхід, заснований на застосуванні фільтра усереднення. Цей фільтр збирає значення пікселів у невеликих прямокутних областях, як правило, розміром 5×5 пікселів, і замінює їх середнім значенням, яке вважається еталонним або «неушкодженим полем» ($NDWI_{filter}$). Цей процес фільтрації дозволяє ефективно згладити значення індексу рослинності, навіть якщо поле зазнало пошкоджень, таких як воронки від бомб або сліди від військових машин. У результаті ми створюємо модель

$NDWI_{filter}$, яка слугує еталоном для порівняння з реальними значеннями NDWI поля для виявлення пошкоджень.

Ми обчислюємо різницю між відфільтрованими та реальними значеннями пікселів NDWI (4). Потім, на основі відфільтрованих значень NDWI, обчислюється порогове значення як суму середнього значення та коефіцієнта k , помноженого на стандартне відхилення в межах поля (5). Коефіцієнт k було обрано вручну та встановлено на 0,5, що представляє половину стандартного відхилення.

$$NDWI_{diff} = NDWI_{filter} - NDWI, \quad (4)$$

$$treshhold = NDWI_{diff_{mean}} + 0.5 * NDWI_{diff_{stdDev}}. \quad (5)$$

Тут $NDWI_{filter}$ — відфільтроване значення NDWI, $NDWI$ — фактичне значення NDWI, $NDWI_{diff}$ — різниця між відфільтрованим і фактичним значеннями NDWI, $NDWI_{diff_{mean}}$ — середнє значення відфільтрованого NDWI в межах поля, $NDWI_{diff_{stdDev}}$ — стандартне відхилення відфільтрованого NDWI в межах поля.

Потім для виявлення темних кратерів і пожеж використано (6), а для виявлення білих кратерів — (7).

$$NDWI_{black} = \begin{cases} 1, & \text{if } NDWI_{diff} + treshhold < 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}, \quad (6)$$

$$NDWI_{white} = \begin{cases} 1, & \text{if } NDWI_{diff} - treshhold > 0. \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

У результаті будуть об'єднані аномалії, виявлені за допомогою каналів, і аномалії, виявлені за допомогою аналізу індексу NDWI (8).

3.3. Аналіз індикаторів економічної діяльності на основі різномірних даних

$$Damage = \begin{cases} Green_{dam} * NDWI_{black}, \\ Blue_{dam} * NDWI_{white}. \end{cases} \quad (8)$$

Для ідентифікації кратерів за допомогою даних SkySat було застосовано раніше розроблена модель керованого глибокого навчання [39]. По-перше, кратери були вручну ідентифіковані на супутникових знімках. Потім отримані результати були використані для навчання нейронної мережі U-Net, яка після навчання дозволила автоматично визначати пошкоджені ділянки. Цей алгоритм шукає кратери як на сільськогосподарських полях, так і в інших областях. Для дослідження кратерів лише на сільськогосподарських полях векторні межі всіх кратерів, виявлених за допомогою даних SkySat, були перетнуті з векторними межами сільськогосподарських полів із ділянками, наданими Synergize.

Як вже зазначалося раніше, при розв'язанні задачі ми прагнемо оцінити можливості даних Sentinel-2 (10 м) і PlanetScore (3 м) у визначенні пошкоджених областей, які раніше були визначені як пошкоджені за допомогою даних VHR SkySat (0,5 м). Для досягнення поставленої мети ми обчислимо площу кратерів, виявлених за допомогою даних Sentinel-2 і PlanetScore, і порівняємо її з площею кратерів, виявлених за допомогою даних SkySat. Важливо зрозуміти рівень узгодженості та розбіжності між різними наборами даних. Крім того, буде застосована візуальна інтерпретація зображень Sentinel-2 і PlanetScore, для відстеження динаміки розвитку кратерів з часом. Цей візуальний аналіз надасть додаткове уявлення про зміни пошкоджених областей, чого неможливо досягти за допомогою методології, яка базується виключно на даних SkySat за одну дату.

3.1.7. РЕЗУЛЬТАТ ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ РІЗНОГО РОЗРІЗНЕННЯ

Використовуючи зображення SkySat, в праці [45] було встановлено, що в зоні інтересу 259 із 370 полів, або 70%, містять кратери через військові дії. Поля, на яких не було виявлено кратерів, насправді мають дуже малу площу або лише частково охоплені супутниковими знімками (рис. 26). Використовуючи дані Sentinel-2 і PlanetScore, було виявлено 7889 кратерів (або 42%) на

10-метровому зображенні Sentinel-2 і 10 143 кратери (54%) — на 3-метрових зображеннях PlanetScore.

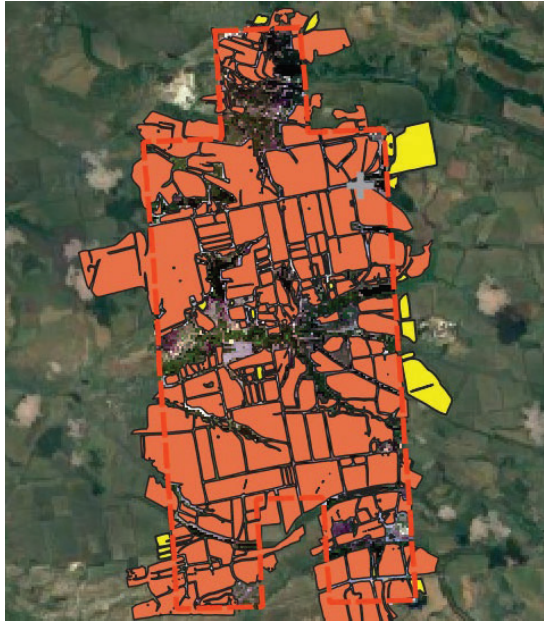


Рис. 26. Поля з виявленими кратерами (помаранчеві) і поля, де не виявлено кратерів (жовті) за даними SkySat

Для визначення зв'язку між виявленими кратерами та їх площами було побудовано також графік щільності. Виявлення кратерів за допомогою Sentinel-2 стає складним для кратерів, площа яких менше 100 м^2 , що дорівнює площі одного пікселя Sentinel-2 (рис. 27). Максимальна щільність виявлених кратерів спостерігається на площі приблизно 150 м^2 .

В процесі аналізу щільності виявлених кратерів на зображеннях PlanetScore (рис. 28) було виявлено, що дані PlanetScore більш ефективні для виявлення кратерів меншого розміру. Однак за допомогою даних PlanetScore неможливо виявити кратери площею менше 50 м^2 . Для аналізу великих кратерів (площею понад 250 м^2) дані PlanetScore та Sentinel-2 демонструють майже однакову корисність.

Для оцінки загальної пошкодженої площі була розрахована загальна площа кратерів, виявлених за допомогою Sentinel-2 і окремо за допомогою PlanetScore (рис. 29). За допомогою даних супутника Sentinel-2 виявлено кратери загальною площею 165 га, що становить 51,42% від загальної площі кратерів, визначених за даними SkySat. Крім того, використовуючи дані PlanetScore, були ідентифіковані кратери загальною площею 202 га (62,89%).

3.3. Аналіз індикаторів економічної діяльності на основі різномірних даних

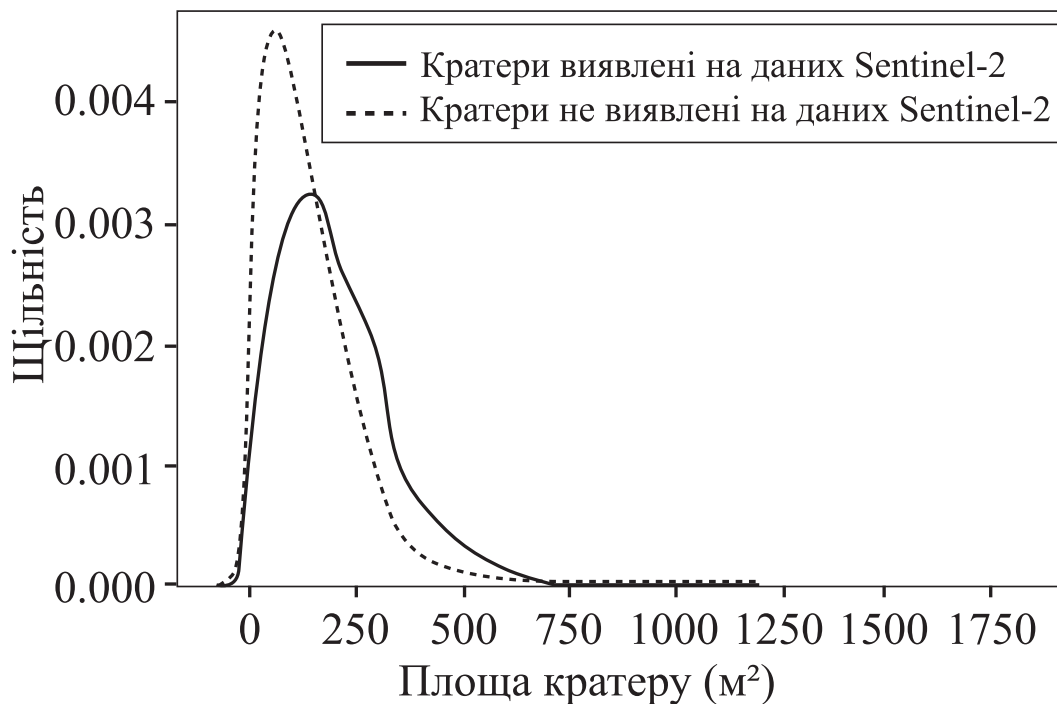


Рис. 27. Діаграма щільності виявлених і невиявлених кратерів залежно від їх площі за даними Sentinel-2

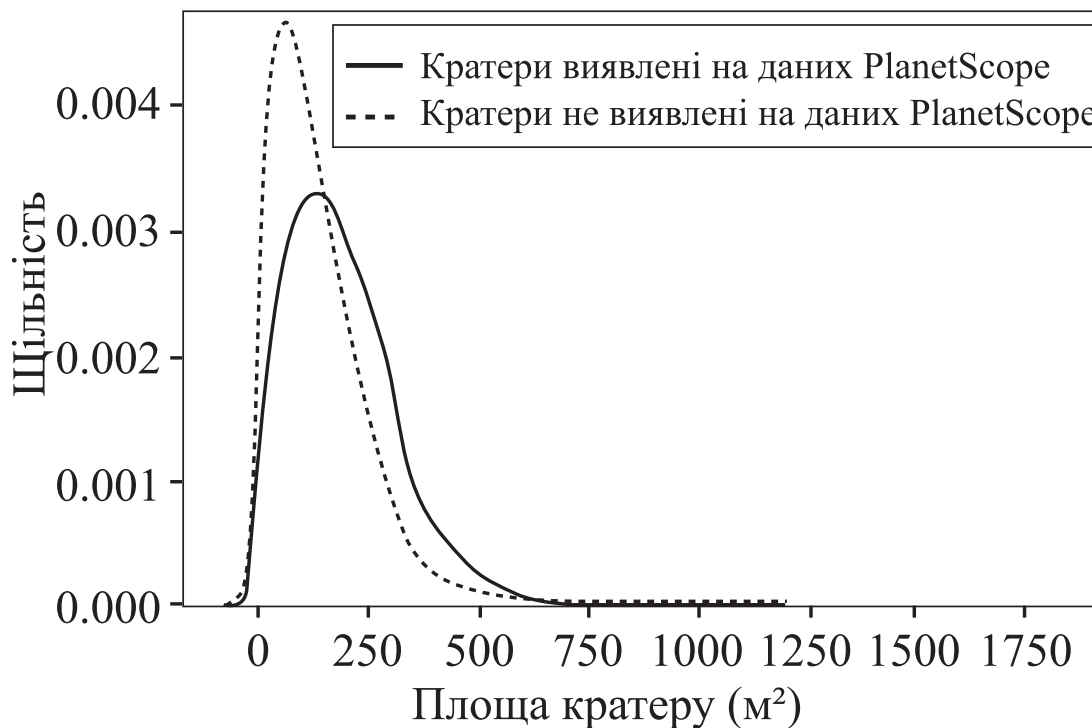


Рис. 28. Діаграма щільності виявлених і невиявлених кратерів залежно від їх площі за даними PlanetScope

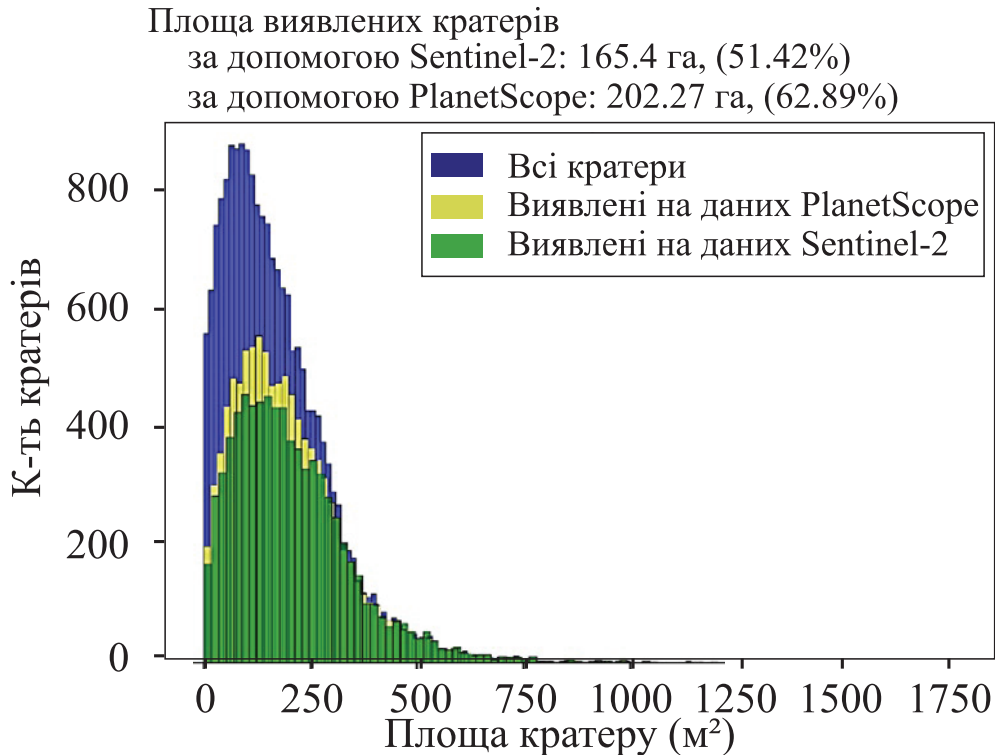


Рис. 29. Площа виявлених кратерів

Варто зазначити, що виявлені за допомогою супутника SkySat зони пошкоджень також не ідеальні. Під час аналізу були ідентифіковані деякі кратери, які не були розпізнані за допомогою SkySat і методології на основі глибокого навчання, але були ідентифіковані за допомогою супутників Sentinel-2 і PlanetScore на основі виявлення аномалій.

На рис. 30-а можна побачити, що кратери, ідентифіковані на основі машинного навчання на зображеннях SkySat, представлені фіолетовими векторними контурами і не охоплюють усі пошкоджені ділянки в регіоні. Однак за допомогою методології виявлення аномалій на основі спектральних смуг і NDWI на даних PlanetScore (рис. 30-b) і Sentinel-2 (рис. 30-с) ці пошкодження було виявлено (показано пікселями червоного кольору).

Крім того, за допомогою аналізу аномалій, навіть на безкоштовних даних можна виявити згорілі ділянки, сліди військової техніки тощо. Тому, хоча багато кратерів, виявлені на даних SkySat з використанням машинного навчання, були пропущені, метод пошуку аномалій на основі на супутникових знімках Sentinel-2 або PlanetScore не можна назвати неефективними. Тому для досягнення хорошого результату слід поєднувати комерційні та безкоштовні дані та обидві методології.

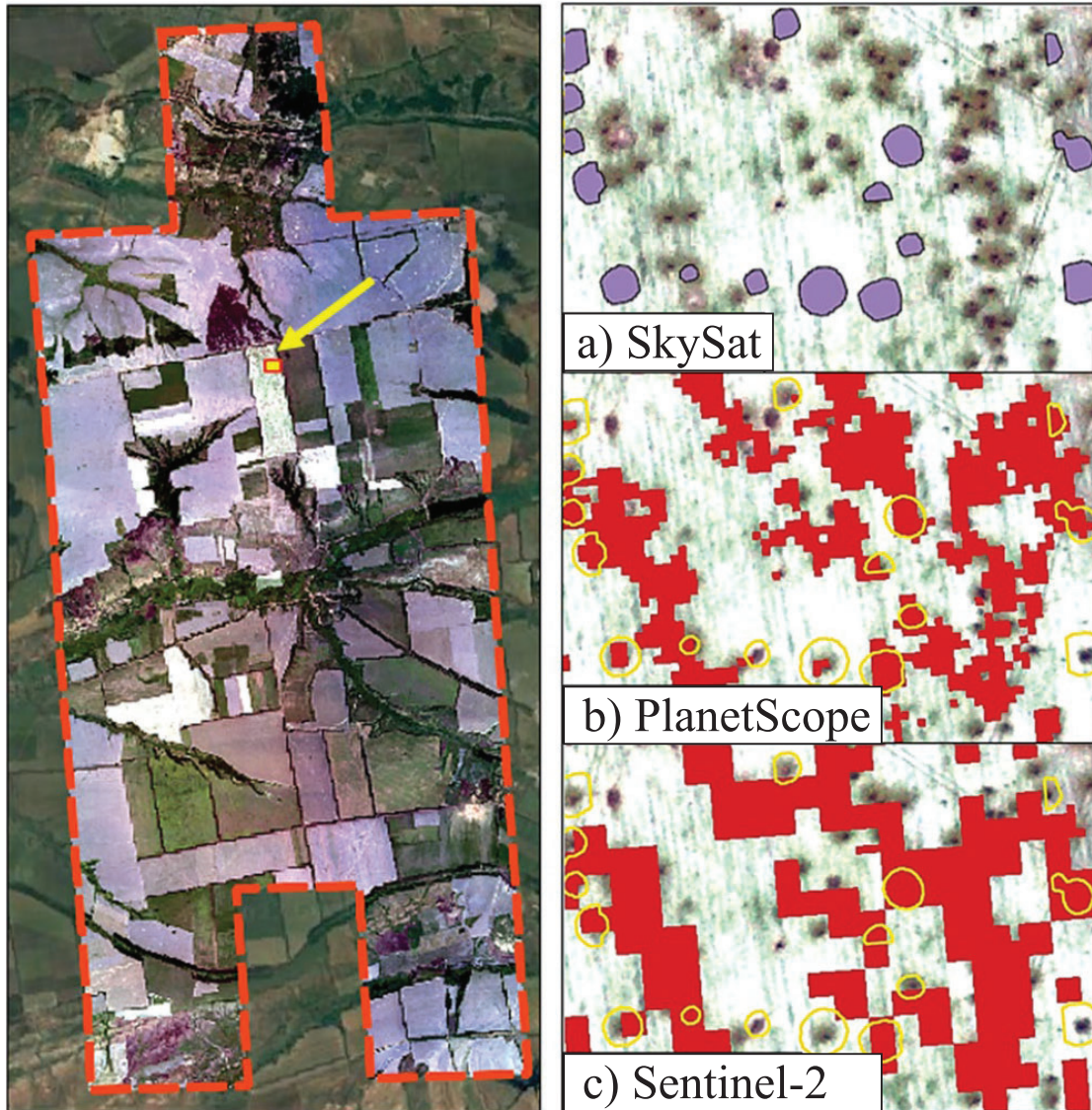


Рис. 30. Виявлені пошкодження з використанням різних супутникових даних і методології

Наступним кроком стала спроба реконструювати історію кратерів. Для досягнення цієї мети випадковим чином були вибрані деякі поля на зображенні SkySat від 2 липня 2022 р. (рис. 31).

Для цього були зібрані всі доступні дані за період з березня по липень із супутників Sentinel-2 і PlanetScope і проаналізовані візуально. Даних Sentinel-2 виявилось недостатньо, оскільки лише три зображення (рис. 32) були безхмарними та придатними для подальшого аналізу. Однак ці зображення чітко зафіксували пошкодження поля. З іншого боку, на рис. 33 зображені знімки PlanetScope, які виявилися найбільш інформативними для виявлення кратерів.

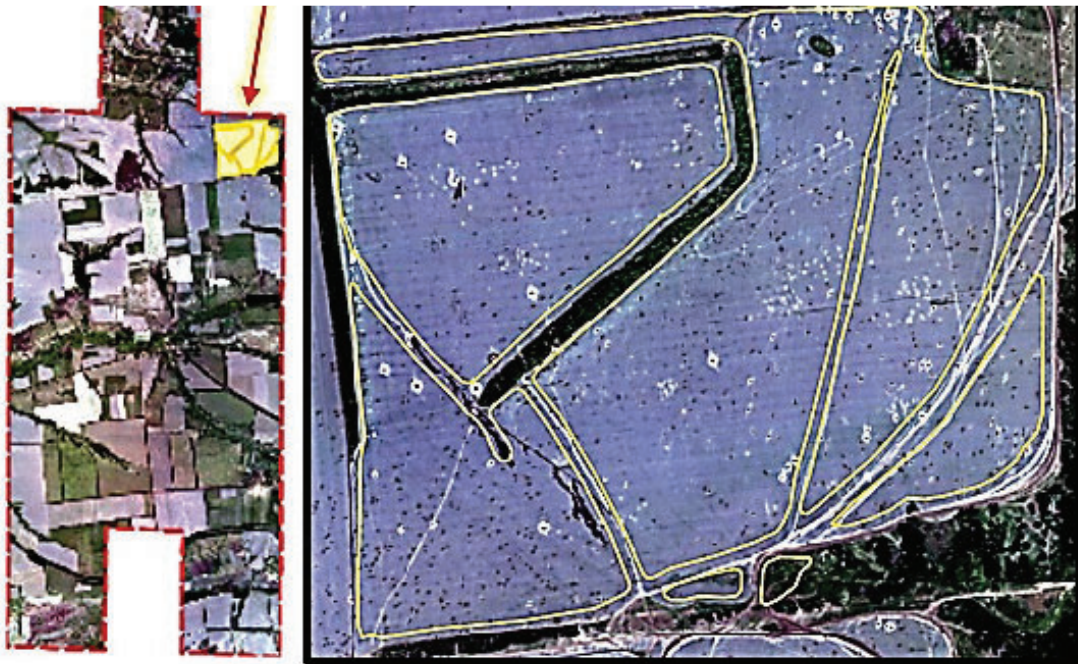


Рис. 31. Територія для спостереження за історією кратерів



Рис. 32. Знімки супутника Sentinel-2, придатні для аналізу обраної території до 2 липня 2022 р.

За результатами аналізу встановлено, що перші пошкодження на досліджуваній території були зафіксовані 25 травня 2022 р. Після цієї дати з'явилися нові пошкодження. Була зафіксована дата візуального виявлення на зображеннях PlanetScore для кожного з кратерів, які раніше були ідентифіковані за допомогою алгоритмів машинного навчання на даних SkySat. Це дозволило визначити, які пошкодження і скільки їх можна спостерігати на зображеннях у конкретний день (рис. 33).

3.3. Аналіз індикаторів економічної діяльності на основі різномірних даних

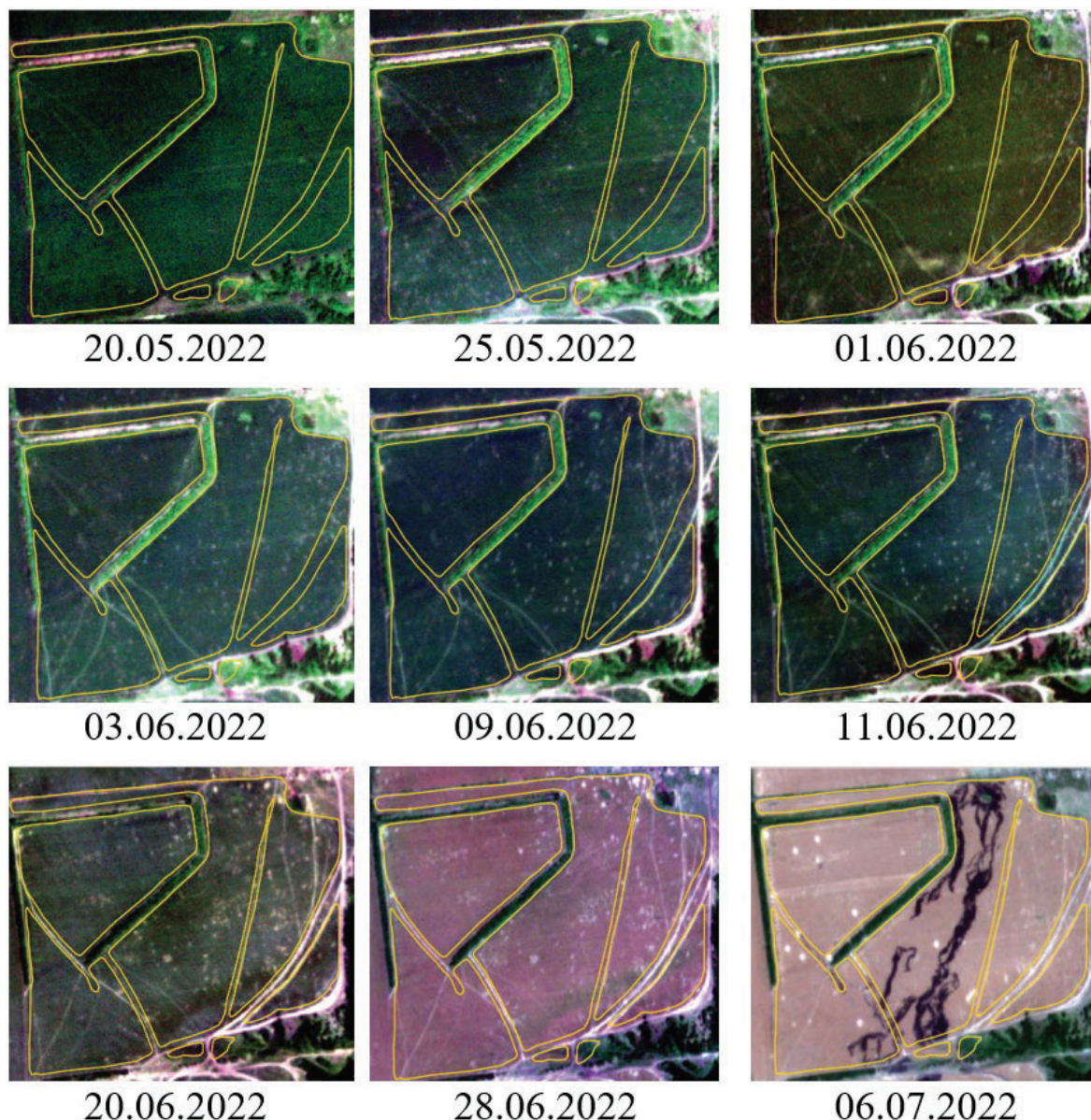


Рис. 33. Найбільш інформативні знімки із супутника PlanetScore для виявлення пошкоджень на вибраній території

На рис. 34 і рис. 35 бачимо, що найбільшу кількість кратерів було виявлено 25 травня 2022 р. (395). Цілком можливо, що кратери, які утворилися в той же період, але не були ідентифіковані відразу, будуть виявлені в майбутньому. Також чітко були зафіксовані нові місця пошкоджень. Зокрема, 20, 28 червня та 6 липня було зафіксовано багато нових кратерів, які значно більші за розміром і світлішого кольору. Варто зазначити, що 178 кратерів не вдалося виявити за допомогою візуального огляду знімків PlanetScore, ймовірно, через їх малий розмір.

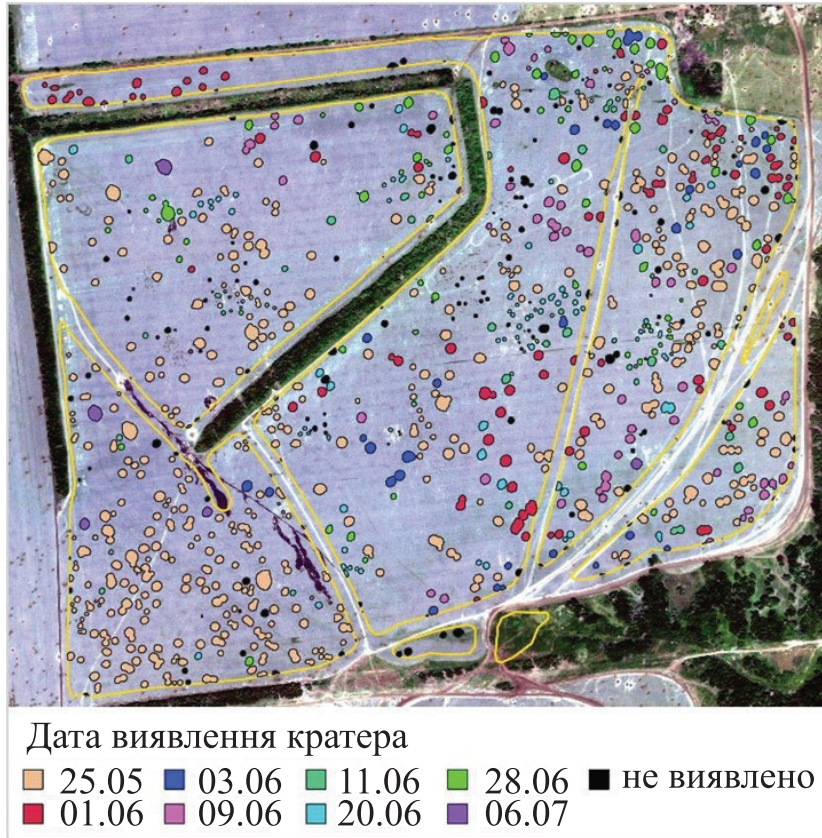


Рис. 34. Кратери, ідентифіковані візуальним оглядом зображень PlanetScore, розподілені за датою

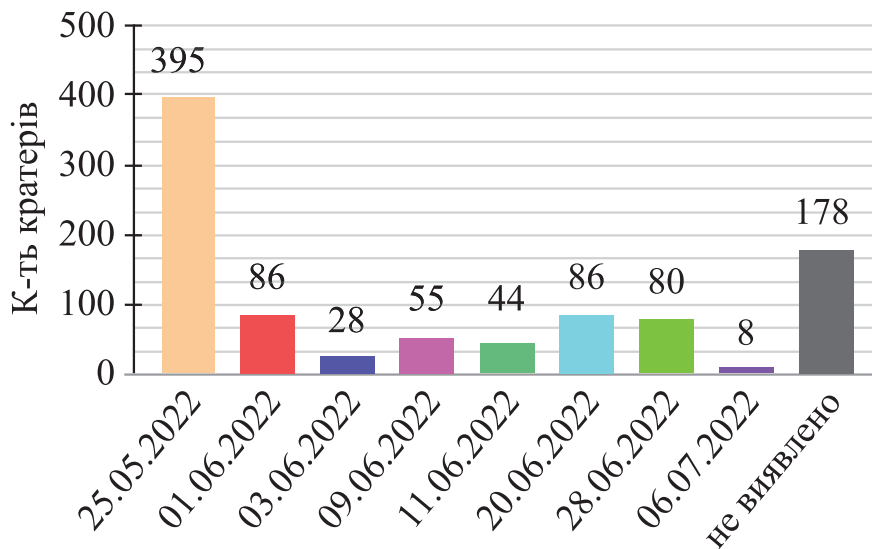


Рис. 35. Розподіл кількості кратерів за датою виявлення

Була також відтворена історія подальшого розвитку цих кратерів. Для цього використані дані Sentinel-2 (рис. 36) і PlanetScore (рис. 37) дані за липень-жовтень 2022 р. та одне зображення PlanetScore за червень 2023 р. Як бачимо з рисунків, 06.07.2022 р. досліджувані поля постраждали від пожежі. Подальше

3.3. Аналіз індикаторів економічної діяльності на основі різномірних даних

дослідження зображень за 9 та 13 липня дозволило виявити прогресуюче розширення вигорілих областей, зокрема прослідковуючи поширення до лівої частини поля. Пізніше на знімку Sentinel-2 від 17 липня (рис. 36) бачимо поширення пожежі в праву частину поля. До 28 серпня сліди пожежі в основному зникли разом з більшістю кратерів. Однак завдяки спостереженням, проведеним 5 і 15 жовтня, було виявлено, що кратери вкрилися зеленою рослинністю. Більше того, навіть через рік, у червні 2023 р., на досліджуваному полі все ще бачимо ділянки, які постраждали від кратерів і пожежі. Це спостереження дає підстави зробити висновок, що збитки, спричинені військовими діями, можуть зберігатися роками.

Тому, використовуючи відкриті дані Sentinel-2 і PlanetScore, ми змогли визначити приблизні дати появи кратерів, виявлених за даними SkySat, реконструювати історію та простежити динаміку розвитку пошкоджень на родовищах.

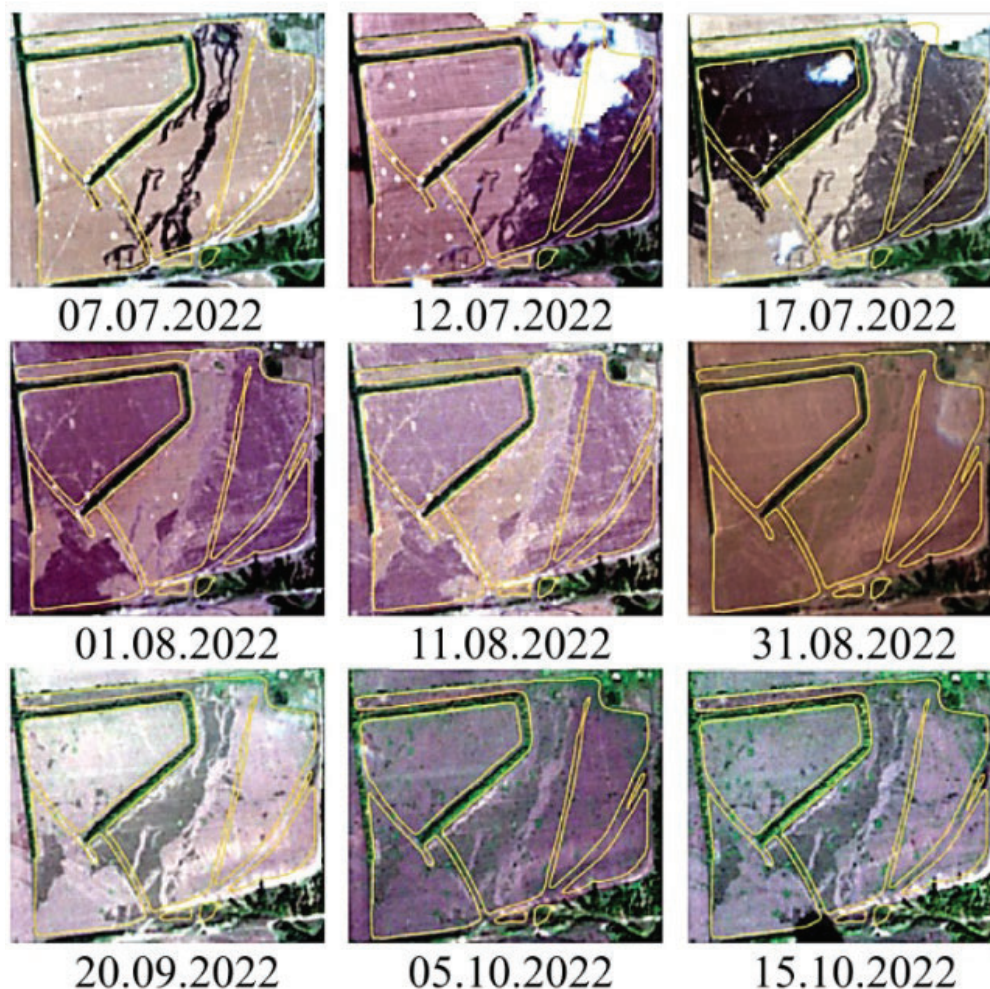


Рис. 36. Динаміка розвитку пошкоджень (Sentinel-2)

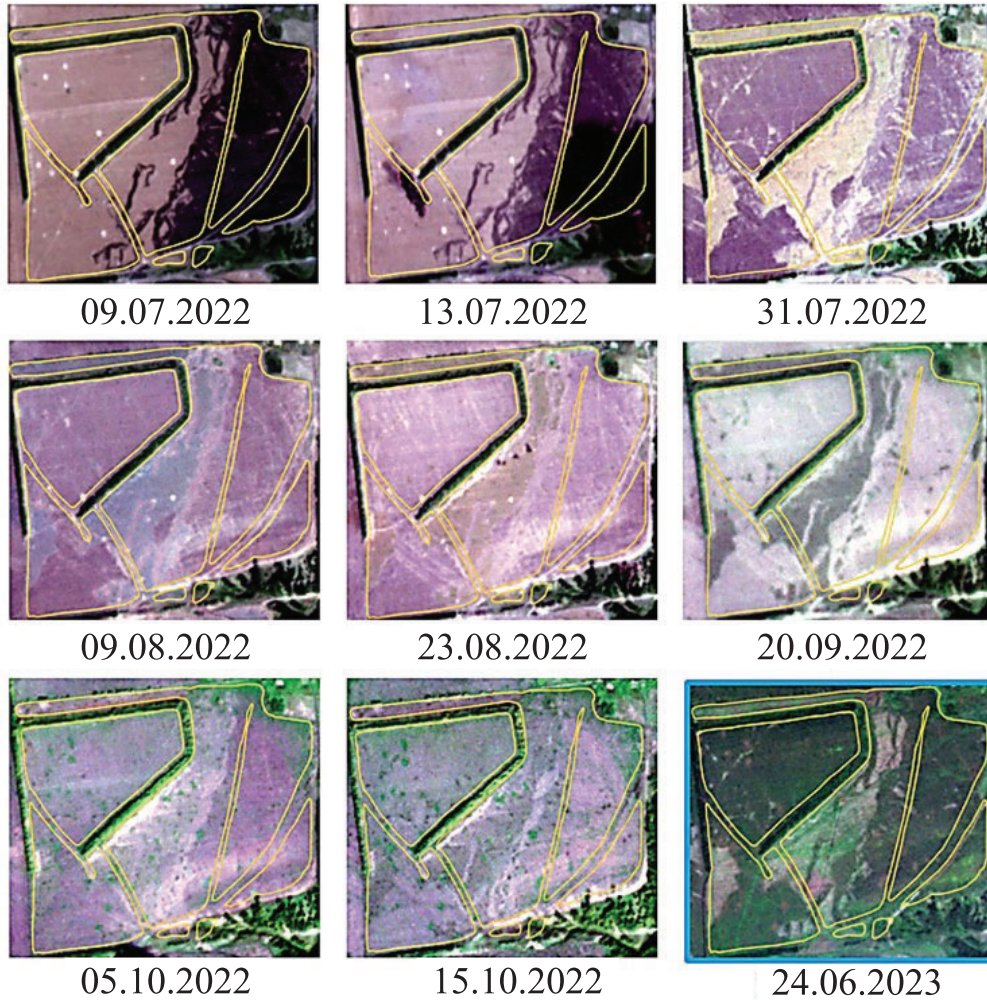


Рис. 37. Динаміка розвитку пошкоджень (PlanetScore)

ВИСНОВКИ

В даному розділі наведено результати комплексного аналізу взаємозв'язків між непрямими індикаторами стану навколишнього середовища (якість повітря, нічне освітлення тощо) та показниками економічної активності регіонів України. Проведені дослідження показали, що динаміка рівня забруднення повітря твердими частинками $PM_{2.5}$ тісно корелює із змінами чисельності населення та може слугувати опосередкованим індикатором міграційних процесів та економічної активності.

Продемонстровано, що показники нічного освітлення, отримані на основі супутникових даних, дають цінну інформацію про рівень економічного розвитку регіонів. Виявлено сильний кореляційний зв'язок між освітленістю та ВВП. Встановлено стійкі кореляційні залежності між економічними показниками окремих галузей промисловості та сільського господарства і непрямими

3.3. Аналіз індикаторів економічної діяльності на основі різномірних даних

індикаторами, такими як нічне освітлення та якість повітря. Показано, що такі галузі як переробна та видобувна промисловість мають високий рівень кореляції з рівнем ВВП та освітленістю. Це свідчить про те, що рівень освітленості може використовуватися як індикатор економічної діяльності.

На основі аналізу супутникових даних Sentinel та інших джерел геопросторової інформації з використанням методів машинного та глибокого навчання кількісно оцінено вплив війни на економіку та аграрне виробництво в Україні. Наразі супутникова інформація часто є єдиним достовірним джерелом для оцінки площ пошкоджених та окупованих сільськогосподарських земель. Так, окуповані сільськогосподарські землі у 2022 р. становлять 5.7 млн га. Загальна площа безпосередньо пошкоджених полів становить 1,4 млн га (станом на 10 вересня 2023 р.). Отримані результати ілюструють застосовність використання даних спостереження Землі як альтернативного джерела для оперативного моніторингу економічної ситуації в умовах обмеженої офіційної статистики.

Також в даному розділі проаналізовано використання супутникових зображень різної роздільної здатності для виявлення та картування пошкоджень сільськогосподарських угідь в Україні, спричинених війною. Для виявлення пошкоджень, таких як артилерійські воронки, були використані зображення з супутників PlanetScope (3 м), Sentinel-2 (10 м) та SkySat (0,5 м). Продемонстровано ефективність поєднання комерційних та відкритих супутникових даних з різним просторовим розрізненням для аналізу динаміки та оцінки масштабів пошкоджень сільськогосподарських угідь.

Розроблені підходи інтеграції гетерогенних даних із використанням сучасних методів аналізу та глибокого навчання дозволяють підвищити ефективність моніторингу економічної активності.

Результати дослідження вкотре показали, що супутникові дані можуть слугувати потужним інструментом для оцінки стану сільськогосподарських угідь і прогнозування врожайності. В умовах, коли традиційні методи аграрної статистики стають малоефективними через бойові дії або інші кризові фактори, супутникові зображення надають точну картину змін у посівних площах та дозволяють оцінювати втрати аграрного сектору. Це

особливо важливо для країн із сильною залежністю від сільського господарства, таких як Україна, де аграрний сектор є критично важливим для економіки та забезпечення продовольчої безпеки.

Важливо також підкреслити, що непрямі індикатори економічної активності не лише доповнюють класичні статистичні показники, а й у багатьох випадках стають основним джерелом інформації, особливо під час кризових ситуацій, коли доступ до традиційних даних є обмеженим. Використання новітніх технологій збору та аналізу даних, зокрема супутникового моніторингу, дає змогу отримувати актуальну та точну інформацію в реальному часі, що є важливим інструментом для прийняття обґрунтованих управлінських рішень в умовах кризи та оптимізації відновлення економіки країни після війни.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Copernicus Atmosphere Monitoring Service. Режим доступу: <https://atmosphere.copernicus.eu/charts/packages/cams/>
2. Lavreniuk M., Shumilo L., Yailymov B., et al. Reviewing Deep Learning Methods in the Applied Problems of Economic Monitoring Based on Geospatial Data. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2022. Vol. 58, no. 6. pp. 1008-1020. <https://doi.org/10.1007/s10559-023-00535-9>.
3. Лавренюк М. С., Шуміло Л. Л., Яйлимов Б. Я., та ін. Огляд методів глибинного навчання у прикладних задачах економічного моніторингу на основі геопросторових даних. *Кібернетика та системний аналіз*. 2022. Vol.58. no. 6. pp. 177-192.
4. Dijkstra L., Poelman H., Veneri P. The EU-OECD Definition of a Functional Urban Area. OECD iLibrary OECD Publishing. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1787/20737009>.
5. Gerasopoulos E., Bailey J., Athanasopoulou E., et al. Earth observation: An integral part of a smart and sustainable city. *Environmental Science & Policy*. 2022. Vol. 132. pp. 296-307. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.02.033>.
6. Shelestov A., Yailymova H., Yailymov B., et al. Air quality estimation in Ukraine using SDG 11.6. 2 indicator assessment. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, no. 23. DOI: doi.org/10.3390/rs13234769.
7. Куссуль Н.М., Федоров О.П., Шелестов А.Ю. Моніторинг досягнення цілей сталого розвитку України за супутниковими

3.3. Аналіз індикаторів економічної діяльності на основі різномірних даних

даними. К.: “Наукова думка”. 2023. 164 с.
<https://doi.org/10.15407/978-966-00-1865-5>.

8. Ukrainian census. Режим доступу:
http://db.ukrcensus.gov.ua/PXWEB2007/ukr/news/op_popul.asp.

9. Operational UNHCR Data Portal - Refugee Situation in Ukraine. Режим доступу: <https://data.unhcr.org/en/situations/ukraine>.

10. Yailymova H., Kolotii A., Kussul N., Shelestov A. Air quality as proxy for assesment of economic activity. In IEEE EUROCON 2023-20th International Conference on Smart Technologies. 2023. pp. 89-92.
<https://doi.org/10.1109/EUROCON56442.2023.10198882>.

11. Lehmann A., Mazzetti P., Santoro et al. (2022). Essential earth observation variables for high-level multi-scale indicators and policies. *Environmental Science & Policy*. 2022. Vol. 131. pp. 105-117.
<https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.12.024>.

12. Shumilo L., Skakun S., Gore M. L., et al. (2023). Conservation policies and management in the Ukrainian Emerald Network have maintained reforestation rate despite the war. *Communications Earth & Environment*. 2023. Vol 4. No. 1. 443. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01099-4>.

13. Argys L.M., Averett S.L., Yang M. Light pollution, sleep deprivation, and infant health at birth. *Southern Economic Journal*. 2021. Vol. 87, no. 3. pp. 849-888. DOI: <https://doi.org/10.1002/soej.12477>.

14. VIIRS Stray Light Corrected Nighttime Day/Night Band Composites Version 1. Режим доступу:
https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/NOAA_VIIRS_DNB_MONTHLY_V1_VCM_SLCFG#bands.

15. Skakun S., Justice C.O., Kussul N., et al. Satellite data reveal cropland losses in South-Eastern Ukraine under military conflict. *Frontiers in Earth Science*. 2019. Vol. 7. DOI: <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00305>.

16. Skakun S., Abys C., Adegbenro M., et al. High-Impact Hot Spots of Land Cover Land Use Change in Ukraine. 2022 12th International Conference on Dependable Systems, Services and

Technologies (DESSERT). 2022. pp. 1-5, DOI: 10.1109/DESSERT58054.2022.10018657.

17. Валовий регіональний продукт (ВРП) з державної статистики України. Режим доступу: (https://ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2021/vvp/kvartal_new/vrp/arh_vrp_u.html).

18. Статистичні показники переробної промисловості за кількістю підприємств в регіонах. Режим доступу: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2021/fin/pdp_roz_reg/kdp_ved_14-20.xlsx.

19. Статистичні показники переробної промисловості за обсягом переробної продукції. Режим доступу: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2021/fin/pdsg/orpsg_ved_15-20.xlsx.

20. Kussul N., Deininger K., Shumilo L., et al. Biophysical impact of sunflower crop rotation on agricultural fields. *Sustainability*, 2022. Vol. 14. No. 7. 3965. <https://doi.org/10.3390/su14073965>.

21. Kussul N., Drozd S., Yailymova H., et al. Assessing damage to agricultural fields from military actions in Ukraine: An integrated approach using statistical indicators and machine learning. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2023. Vol. 125. No. 103562.

22. Yailymova H., Yailymov B., Kussul N., et al. Geospatial Analysis of Life Quality in Ukrainian Rural Areas. In 2023 13th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT). 2023. pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/DESSERT61349.2023.10416517>.

23. Мікава П. В., Дрозд С. Ю. (2023). Метод виявлення пошкоджень земної поверхні внаслідок воєнних дій за допомогою супутникових даних. *Проблеми керування та інформатики*. 2023. Vol. 68. No. 6. pp. 83–93. doi: 10.34229/1028-0979-2023-6-6.

24. Kussul N., Shelestov A., Yailymova H., et al. Agriculture land appraisal with use of remote sensing and infrastructure data. In *IGARSS 2022-2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2022. pp. 2785-2788. DOI: 10.1109/IGARSS46834.2022.9884045.

3.3. Аналіз індикаторів економічної діяльності на основі різномірних даних

25. Deininger K., Ali D. A., Kussul N., et al. Quantifying war-induced crop losses in Ukraine in near real time to strengthen local and global food security. *Food Policy*. 2023. Vol. 115, no. 102418. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2023.102418>.

26. Lavreniuk M., Shumilo L., Lavreniuk A. Generative Adversarial Networks for the Satellite Data Super Resolution Based on the Transformers with Attention. In *IGARSS 2023-2023 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2023. pp. 6294-6297.

27. Shumilo L., Okhrimenko A., Kussul N., et al. Generative adversarial network augmentation for solving the training data imbalance problem in crop classification. *Remote Sensing Letters*. 2023. Vol. 14. No. 11. pp. 1129-1138.

28. Qadir A., Skakun S., Kussul N., et al. A generalized model for mapping sunflower areas using Sentinel-1 SAR data. *Remote Sensing of Environment*. 2024. Vol. 306. 114132. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114132>.

29. Shelestov A., Yailymov B., Yailymova H., et al. Advanced Method of Land Cover Classification Based on High Spatial Resolution Data and Convolutional Neural Network. *Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT*. 2022. Vol. 10, No. 1. pp. 125-132. doi:10.25673/76943.

30. Kussul N., Shelestov A., Yailymov B. *Cloud Platforms and Technologies for Big Satellite Data Processing*. Cham: Springer Nature Switzerland. 2022. pp. 303-321. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46880-3_19.

31. Shelestov A., Yailymov B., Yailymova H., et al. *Cloud-Based Technologies for Data Processing in Ukraine: International Context*. Cham: Springer International Publishing. 2021. pp. 101-118. DOI: 10.1007/978-3-031-16368-5_5.

32. Kussul N., Drozd S., Yailymova H. Forecast of Yield of Major Crops in Ukraine in War Conditions 2022 Based on MODIS and Sentinel-2 Satellite Data. In *Proceedings of the 11th International Conference on Applied Innovations in IT, (ICAIIT)*. 2023. pp. 89-95.

33. Kussul N., Shelestov A., Yailymov B., et al. (2022, December). Analysis of Cultivated Areas in Ukraine During the War. In *2022 12th*

International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT). 2022. pp. 1-4.

34. Kussul N., et al. Satellite agricultural monitoring in Ukraine at country level: world bank project. In: IGARSS 2020-2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2020. p. 1050-1053.

35. Sarvia F., De Petris S., Borgogno-Mondino E. A methodological proposal to support estimation of damages from hailstorms based on copernicus sentinel 2 data times series. Computational Science and Its Applications–ICCSA 2020: 20th International Conference. Springer International Publishing. 2020. pp. 737-751.

36. Gabbrielli M., Corti M., Perfetto M., Fassa, V., et al. Satellite-based frost damage detection in support of winter cover crops management: A case study on white mustard. *Agronomy*, 2022. Vol. 12, no. 9. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12092025>.

37. Skakun S., Kussul N., Shelestov A., et al. The use of satellite data for agriculture drought risk quantification in Ukraine. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2016. Vol. 7, no. 3. pp. 901-917.

38. Solaimani K., Sharifipour M., Abdoli Boozhane S. Flood damage detection algorithm using Sentinel-2 images (case study: Golestan flood of March 2019). *Iranian journal of Ecohydrology*. 2020. Vol. 7, no. 2. pp. 303-312. DOI: [10.22059/IJE.2020.292005.1233](https://doi.org/10.22059/IJE.2020.292005.1233).

39. Duncan E.C., Skakun S., Kariryaa A., et al. Detection and mapping of artillery craters with very high spatial resolution satellite imagery and deep learning. *Science of Remote Sensing*. 2023. Vol. 7, no. 100092. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.srs.2023.100092>.

40. Kussul N., Yailymova H., Drozd S. Detection of War-Damaged Agricultural Fields of Ukraine Based on Vegetation Indices Using Sentinel-2 Data. 2022 12th International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies (DESSERT). 2022. pp. 1-5. DOI: [10.1109/DESSERT58054.2022.10018739](https://doi.org/10.1109/DESSERT58054.2022.10018739).

41. Shelestov A., Drozd S., Mikava P., et al. War Damage Detection Based on Satellite Data. In *Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT*. 2023. Vol. 11, no. 1. pp. 97-103.

3.3. Аналіз індикаторів економічної діяльності на основі різномірних даних

42. Skysat - Planet Developer Documentation. Режим доступу: <https://developers.planet.com/docs/data/skysat/>.

43. PlanetScope - Planet Developer Documentation. Режим доступу: <https://developers.planet.com/docs/data/planetscope/>.

44. European Space Agency (ESA). Sentinel-2 - Observing the Earth - Copernicus. Режим доступу: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2.

45. Kussul N., Drozd S., Skakun S., Duncan E., Becker-Reshef I. Fusion of very high and moderate spatial resolution satellite data for detection and mapping of damages in agricultural fields. The 13th IEEE International Conference on Dependable Systems, Services and Technologies, DESSERT'2023. 13-15 October, 2023, Athens, Greece. doi: 10.1109/DESSERT61349.2023.10416533.