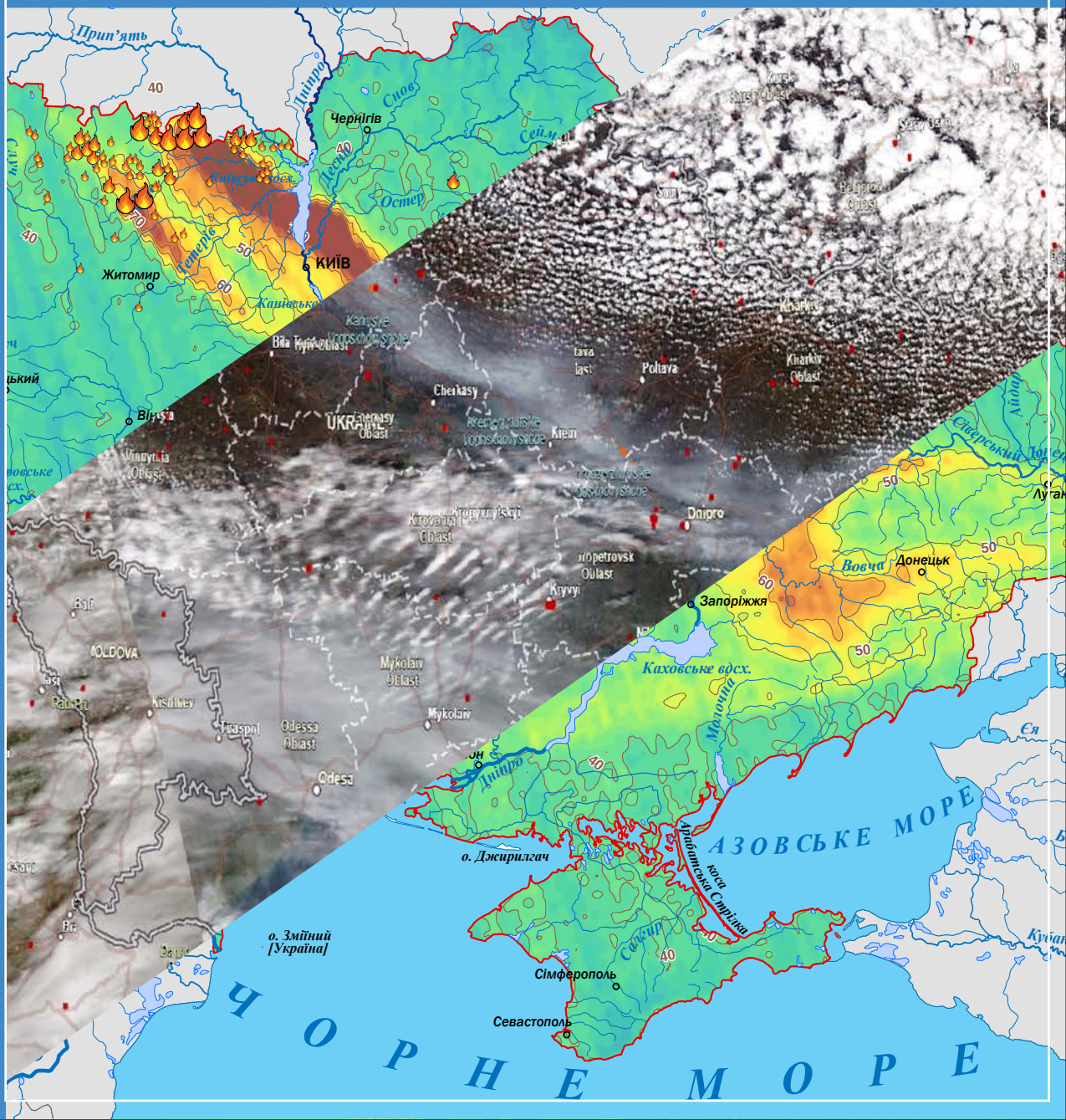
Володимир ОСАДЧИЙ
Андрій ОРЕЩЕНКО
Михайло САВЕНЕЦЬ

СУПУТНИКОВИЙ МОНІТОРИНГ ПОЖЕЖ І ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ



Державна служба України з надзвичайних ситуацій
Національна академія наук України
Український гідрометеорологічний інститут

Володимир ОСАДЧИЙ
Андрій ОРЕЩЕНКО
Михайло САВЕНЕЦЬ

СУПУТНИКОВИЙ МОНІТОРИНГ ПОЖЕЖ І ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

КИЇВ • 2023

https://doi.org/10.15407/uhmi.2023_1
УДК 621.396.967; 621.396.962, 504.062.2+551.501.8
О-72

Автори

Володимир ОСАДЧИЙ, Андрій ОРЕЩЕНКО
(передмова, розділи 1, 2, 4.1 і 4.2, висновки і перспективи),
Михайло САВЕНЕЦЬ (передмова, розділи 3 і 4.3, висновки і перспективи)

Рецензенти

Геннадій МІЛІНЕВСЬКИЙ, доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач науково-дослідної лабораторії фізики космосу Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Михайло ПОПОВ, доктор технічних наук, професор, член-кореспондент НАН України, директор Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук Національної академії наук України»

Рекомендовано до друку вченою радою
Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС України та НАН України
(протокол № 8 від 20.12.2022 р.)

Осадчий В.

О-72 Супутниковий моніторинг пожеж і забруднення атмосферного повітря : монографія / Володимир Осадчий, Андрій Орещенко, Михайло Савенець ; ДСНС України, НАН України, УкрГМІ. Київ, 2023. 256 с.

ISBN 978-617-14-0081-8

Монографія складається з чотирьох розділів. У першому з них описано технічні та науково-прикладні аспекти здійснення супутникового моніторингу викидів тепла. Також представлено просторово-часовий розподіл теплових аномалій і пожеж по території України, виконано порівняння пожежної ситуації в Україні з Польщею, Румунією і Німеччиною. У другому розділі викладено принципи функціонування Системи моніторингу викидів тепла і виявлення потенційно небезпечних пожеж, розробленої в УкрГМІ впродовж 2020—2022 рр. Третій розділ присвячено аналізу забруднення атмосферного повітря на основі даних супутникового моніторингу. В ньому детально проаналізовано просторово-часовий розподіл забруднюючих речовин над територією України за даними супутникових спостережень і використання автоматичної системи моніторингу. У четвертому розділі описано застосування розроблених систем під час російського воєнного вторгнення на територію України.

УДК 621.396.967; 621.396.962, 504.062.2+551.501.8

ISBN 978-617-14-0081-8

© Український гідрометеорологічний інститут, 2023

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА 9

Розділ 1
ПРОСТОРОВИЙ І ЧАСОВИЙ РОЗПОДІЛ ВИКИДІВ ТЕПЛА ТА ВЕЛИКИХ ПОЖЕЖ ПО ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

1.1. Короткий огляд способів виявлення і моніторингу пожеж 17
1.2. Історія розвитку супутникових методів тепловізійного сканування 20
1.3. Принцип і технологія виявлення теплових аномалій за допомогою супутникових інфрачервоних сканерів 26
1.4. Просторовий розподіл викидів тепла по території України. Природні та антропогенні фактори, які впливають на нього 30
1.5. Часовий розподіл викидів тепла по території України і фактори, які впливають на нього 41
1.6. Виявлення пожеж і визначення їх якісних та кількісних критеріїв за супутниковими даними 47
1.7. Просторовий і часовий розподіл великих пожеж по території України і фактори, які впливають на нього. 57
1.8. Порівняння пожежної ситуації в Україні і в європейських країнах. 60

Розділ 2
СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ВИКИДІВ ТЕПЛА ТА ВИЯВЛЕННЯ ПОТЕНЦІЙНО-НЕБЕЗПЕЧНИХ ПОЖЕЖ

2.1. Розроблення концепції Системи моніторингу 69
2.2. Характеристики Системи моніторингу і вимоги до апаратного забезпечення 73
2.3. Структура і короткий опис модулів Системи моніторингу 76
2.4. Технологічна послідовність роботи Системи моніторингу. Збір та опрацювання супутникових даних. 80
2.5. Картографічні процеси в роботі Системи моніторингу 85
2.6. Геопортал Системи моніторингу 89
2.7. Технологічні обмеження і обслуговування пристроїв користувачів 92
2.8. Потенціал вдосконалення програми 96
2.9. Створення бази даних великих лісових пожеж 99
2.9.1. Підготовка даних про теплові аномалії 100
2.9.2. Розроблення скрипту для автоматичного пошуку лісових пожеж 102
2.9.3. Постоброблення бази даних лісових пожеж 108
2.10. Порівняння виявлених пожеж зі статистикою авіаційної охорони лісів Держлісагентства України 110
2.11. Механізми підвищення точності пошуку потенційно небезпечних пожеж 117

Розділ 3
ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИЙ РОЗПОДІЛ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН НАД ТЕРИТОРІЄЮ УКРАЇНИ ЗА ДАНИМИ СУПУТНИКОВИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

3.1. Особливості обробки супутникових даних забруднюючих речовин. 123
3.1.1. Характеристика супутника Sentinel-5P і даних зондування 123
3.1.2. Виявлення помилок та фільтрування супутникових даних 127
3.1.3. Автоматизована система оцінки якості атмосферного повітря на основі супутникових даних 136
3.2. Закономірності просторово-часового розподілу забруднюючих речовин по території України 147
3.3. Порівняння супутникових даних Sentinel-5P з наземними даними державної мережі спостережень 168
3.3.1 Діоксид азоту (NO_2) 172
3.3.2 Монооксид вуглецю (CO) 177
3.3.3 Формальдегід (CH_2O) та діоксид сірки (SO_2) 182
3.4. Забруднення атмосферного повітря в Україні порівняно з іншими країнами Європи 189

Розділ 4
НАСЛІДКИ ПОВНОМАСШТАБНОГО ВТОРГНЕННЯ РФ НА ТЕРИТОРІЮ УКРАЇНИ

4.1. Дешифрувальні ознаки пожеж, що виникли внаслідок бойових дій 201
4.2. Розроблення методики обрахування кількості згорілих матеріалів для оцінки збитків, завданих навколишньому середовищу в результаті бойових дій 214
4.3. Наслідки повномасштабного вторгнення РФ на територію України для забруднення атмосферного повітря за даними супутникових спостережень 227

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ 244

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 247

CONTENT

PREAMBLE 9

Chapter 1
SPATIAL AND TEMPORAL DISTRIBUTION OF HEAT EMISSIONS AND LARGE WILDFIRES ON UKRAINIAN TERRITORY

1.1. A brief review of approaches for wildfires detection and monitoring 17
1.2. A history of satellite methods development of infra-red scanning. 20
1.3. The principle and technology of thermal emissions detecting using satellite infra-red scanners 26
1.4. Spatial distribution of heat emissions on the territory of Ukraine. Natural and anthropogenic factors that influence them 30
1.5. Temporal distribution of heat emissions on the territory of Ukraine and factors that influence them 41
1.6. Detection of firesand determination of qualitative and quantitative criteria of them based on satellite data 47
1.7. Spatial and temporal distribution of large wildfires on the territory of Ukraine . . . 57
1.8. The comparison of fire situation in Ukraine and European countries 60

Chapter 2
THE SYSTEM FOR HEAT EMISSIONS MONITORING AND DETECTION OF POTENTIALLY DANGEROUS WILDFIRES

2.1. Development of the Monitoring system concept 69
2.2. The characteristics of the Monitoring system and hardware requirements 73
2.3. Structure and brief description of modules of the Monitoring system 76
2.4. Technological sequence of the Monitoring system functioning. Collection and processing of satellite 80
2.5. Cartographic processes in the functioning of the Monitoring system 85
2.6. Geoportal of the Monitoring system 89
2.7. Technological limitations and maintenance of user devices 92
2.8. Potential for program improvement 96
2.9. The development of database of large forest fires 99
2.9.1. Preparation of data about heat anomalies 100
2.9.2. The development of script for automatic detection of wildfires. 102
2.9.3. Post-processing of wildfires database 108
2.10. Comparison of discovered fires with statistics of Forest Protection Aviation Service of the State Forestry Agency of Ukraine 110
2.11. Ways to improve the accuracy of searching for potentially dangerous fires 117

Chapter 3. SPATIO-TEMPORAL DISTRIBUTION OF ATMOSPHERIC AIR POLLUTANTS OVER THE TERRITORY OF UKRAINE BASED ON REMOTE SENSING

3.1. The features of air pollutants data processing derived from remote sensing. 123
3.1.1. The description of Sentinel-5P satellite and its data 123
3.1.2. Errors identification and satellite data filtering 127
3.1.3. The automatic system for atmospheric air quality assessment using satellite data in UHMI 136
3.2. Spatio-temporal distribution of atmospheric air pollutants over the territory of Ukraine 147
3.3. The comparison of Sentinel-5P data against ground-level measurements from state monitoring network 168
3.3.1. Nitrogen dioxide (NO_2) 172
3.3.2. Carbon monoxide (CO). 177
3.3.3. Formaldehyde (CH_2O) and sulfur dioxide (SO_2). 182
3.4. Air pollution in Ukraine in comparison to European countries 189

Chapter 4. THE CONSEQUENCES OF FULL-SCALE RUSSIAN INVASION ON THE TERRITORY OF UKRAINE

4.1. Decryption features for wildfires originated because of military actions 201
4.2. The development of methodology for calculation of burned material for environmental losses assessment caused by military actions 214
4.3. The consequences of Russian invasion of Ukraine for atmospheric air pollution using remote sensing 227

CONCLUSIONS AND PROSPECTS FOR FURTHER RESEARCH. 244

REFERENCES 247

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА ПОЗНАЧЕНЬ

GOME-2	— The Global Ozone Monitoring Experiment-2
HDF	— Hierarchical Data Format
Level-0	— супутникові дані нульового рівня архівації
Level-1	— супутникові дані першого рівня архівації
Level-2	— супутникові дані другого рівня архівації
MetOp	— Meteorological Operational satellite
NetCDF	— The Network Common Data Form
NIR	— near infrared spectrum
NRTI	— near-real time (дані в режимі, близькому до реального часу)
OFFL	— offline (режимні дані)
OMI	— The Ozone Monitoring Instrument
QA	— quality assurance index (індекс якості даних)
SCIAMACHY	— SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmo spheric CartograpHY
Sentinel-5P	— Sentinel-5 Precursor
TROPOMI	— TROPOspheric Monitoring Instrument
Suomi NPP	— Suomi National Polar-orbiting Partnership
SWIR	— short-wave infrared spectrum
UUID	— universally unique identifier
UV	— ultraviolet spectrum
UVIS	— ultraviolet-visible spectrum
ВМО	— Всесвітня метеорологічна організація
ГІС	— геоінформаційна система
ГША	— граничний шар атмосфери
УкрГМІ	— Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України
ЦГО	— Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського

Присвячується вченим — захисникам України

ПЕРЕДМОВА

Раціональне природокористування є одним із пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки, перед яким стоїть низка важливих завдань, зокрема з організації використання природних ресурсів у таких обсягах і такими способами, щоб забезпечити сталий економічний розвиток, гармонізацію взаємодії суспільства і природного середовища, раціоналізацію використання природно-ресурсного потенціалу тощо. Один із механізмів реалізації цих завдань полягає у зменшенні вразливості суспільства до небезпечних техногенних та природних явищ і мінімізації економічних збитків від них. Досягти цього можна завдяки ширшому доступу до інформації щодо моніторингу навколишнього середовища та більш ефективному її використанню в процесі прийняття рішень.

Забезпечення якісного моніторингу пов'язане з двома основними проблемами: своєчасність отримання інформації та просторове охоплення території. Необхідність їх вирішення зумовила розвиток методів дистанційного моніторингу, серед яких особливе місце посідає супутниковий моніторинг, який останнім часом починає відігравати дедалі важливішу роль у виявленні небезпечних явищ та оцінюванні їх наслідків. Сьогодні вже величезна кількість штучних супутників Землі здійснюють безперервний моніторинг найрізноманітніших компонентів природного середовища. Причому чим більше природних процесів вдається охопити, тим більш вузькоспеціалізованими стають супутники, що дає можливість поглибити наше розуміння взаємопов'язаності природних процесів, складності формування небезпечних явищ, зокрема їх взаємозалежності з антропогенними процесами. Це сприяло розвитку міждисциплінарних досліджень та формуванню інтегрованого підходу до раціонального природокористування.

Особливим напрямом реалізації раціонального природокористування є моніторинг виникнення, перебігу та ліквідації масштабних пожеж у природному середовищі, насамперед лісових пожеж. Звісно, моніторинг пожеж ніяк не може вплинути на їх перебіг і в жодному разі не замінює заходи із запобігання та ліквідації пожеж, однак цей процес відіграє важливу роль в управлінні такими небезпечними природними явищами. Передусім ідеться про контроль. Так, Державна служба України з надзвичайних ситуацій (ДСНС), маючи об'єктивну числову інформацію, може звертатися до місцевих органів влади, на територіях яких спостерігаються неконтрольовані викиди тепла. Наявність контролю і відповідальність за виникнення пожеж у природному середовищі підвищують дисципліну не лише представників місцевої влади, а й населення. Крім того, об'єктивні числові дані вимірювань дають змогу визначати й оцінювати динаміку розвитку надзвичайної події і на цій основі розробляти більш ефективні заходи боротьби з її наслідками. І найголовніше, своєчасне прийняття правильних управлінських рішень, які реалізуються, як правило, в нормативному полі, дозволяє або взагалі уникнути надзвичайної ситуації, або, якщо вона вже виникла, мінімізувати фінансово-матеріальні витрати, необхідні для її ліквідації.

Супутниковий моніторинг пожеж у природному середовищі свідчить, що вони короткостроково призводять до значного підвищення рівнів забруднення атмосферного повітря. Наслідки пожеж є зіставними, а інколи й перевищують вплив антропогенних викидів у найбільш забруднених містах планети. Загалом добре відомо, що високі рівні забруднення атмосферного повітря є вкрай небезпечними, оскільки негативно впливають і на здоров'я населення, і на природні екосистеми. Однак пожежі часто виникають на значній відстані від пунктів спостереження за якістю атмосферного повітря, а тому раніше цьому джерелу забруднення атмосфери приділяли недостатньо уваги. З удосконаленням супутникових методів моніторингу хімічних складових атмосферного повітря стало можливим оцінити внесок різних джерел викидів забруднюючих речовин, і на сьогодні сталий (а також стійкий до кліматичних змін) розвиток суспільства вже неможливий без урахування забруднення атмосферного повітря, що надходить від усіх джерел викидів.

Окремою проблемою є суттєве збільшення повторюваності й інтенсивності небезпечних та екстремальних явищ погоди, пов'язаних зі зміною клімату. Розрахунки, виконані на основі кліматичних моделей, свідчать про посилення зміни клімату як у короткостроковій, так і в довгостроковій перспективі. Так, згідно з кліматичними прогнозами Всесвітньої метеорологічної організації (ВМО) щодо оцінки глобальної температури, опублікованими 8 липня 2020 року, річна глобальна температура в найближчі п'ять років підвищиться, ймовірно, на 1 °С порівняно з доіндустріальним періодом (1850—1900 рр.). Це безперечно потребує розроблення стратегії адап-

тації до кліматичних змін і, відповідно, посилення контролю за явищами, які ці кліматичні зміни супроводжуватимуть.

Підвищення ступеня захищеності населення і території України, зменшення ризиків виникнення та мінімізація наслідків можливих надзвичайних ситуацій техногенного й природного характеру належать до пріоритетних завдань єдиної державної системи цивільного захисту, що й зазначено в Концепції управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру та Плані заходів щодо її реалізації, прийнятих Кабінетом Міністрів України, відповідно, 22 січня 2014 року і 25 березня 2015 року.

На сьогодні відомо багато способів виявлення як самих пожеж, так і передумов для їх виникнення, частину з яких ДСНС України вже застосовує. Розроблено також кілька систем моніторингу пожеж, які ґрунтуються на використанні загальнодоступних даних про викиди тепла, відображають інформацію на вебкарті і зберігають її у базі даних. Проте наявні системи моніторингу пожеж мають у своїй концепції певні критичні недоліки, які ускладнюють, а іноді й унеможливлюють їх використання у професійних цілях. Серед таких недоліків можна назвати прихований алгоритм роботи програм та відсутність доступу до зібраних оригінальних даних щодо теплових аномалій, що не дає змоги контролювати роботу цих систем; неправильне опрацювання даних, що призводить до втрати важливої інформації про потужність викидів тепла; непридатність для прийняття рішень результатів опрацювання даних, оскільки вони не містять числової інформації. Крім того, всі ці системи моніторингу не відображають дані про об'єкти, на яких спостерігаються викиди тепла, що значно ускладнює роботу з ними, адже потребує ручної перевірки всіх підозрілих на пожежі об'єктів, кількість яких може досягати сотні.

Що стосується придатних для прийняття управлінських рішень систем моніторингу хімічних складових атмосферного повітря, то їх розвиток дещо відстає від розвитку систем моніторингу пожеж, насамперед через складність супутникового вимірювання відповідних параметрів. Наразі просторова роздільна здатність супутників, які моніторять хімічні речовини в атмосфері, лише починає набувати необхідної деталізації. Втім, потреба в таких системах моніторингу дуже велика, і їх основне завдання полягає не стільки в кількісній оцінці перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) забруднюючих речовин, скільки в «сигналізації» про те, що потенційно рівні ГДК можуть бути перевищені.

Метою цієї роботи було розроблення сервісів нового покоління, створених на основі аналізу найсучасніших відкритих даних супутникового моніторингу. Такі нові системи дозволять ідентифікувати на ранніх етапах як неконтрольовані, так і контрольовані пожежі в природних екосистемах, визначати їхню інтенсивність за допомогою певних кількісних

критеріїв сумарної потужності пожежі та площі займання, відображати результати у вигляді набору карт та здійснювати оперативне інформування користувачів. Системи моніторингу якості атмосферного повітря дадуть змогу встановлювати осередки викидів забруднюючих речовин, напрями їх поширення, території, які зазнали негативного впливу, що особливо важливо для тих місць, де немає пунктів наземних спостережень. Повністю автономна робота системи моніторингу не потребуватиме участі операторів для збору даних і формування оперативних повідомлень. Реалізація доступу до інформації за допомогою як комп'ютера, так і смартфона зі встановленим на ньому одним зі стандартних месенджерів, дозволить отримувати оперативну інформацію про пожежі, їхню потужність та напрям переміщення не лише зацікавленим організаціям, а й населенню. Доступ до вихідних даних, відкритий алгоритм та відкритий протокол дадуть змогу контролювати роботу таких систем стороннім фахівцям, а не лише розробникам.

Ця монографія складається з чотирьох частин, присвячених розгляду науково-прикладних і технічних аспектів моніторингу пожеж та забруднення атмосферного повітря.

Перший розділ має теоретичний характер і стосується теплових аномалій (викидів тепла від відкритого вогню та промислових підприємств), а також ландшафтних пожеж. У ньому досліджено просторовий і часовий розподіл теплових аномалій і пожеж по території України, наведено їх порівняння з кількома європейськими державами. Важливим є аналіз передумов, що передують виникненню масштабних пожеж — стан пожежної небезпеки за різних погодних умов, проведення сезонних робіт, вплив людського фактора тощо. У розділі наведено класифікацію способів виявлення пожеж, а також розглянуто технологію виявлення теплових аномалій, зокрема за допомогою термосканерів, встановлених на штучних супутниках Землі. Першорядну увагу приділено методиці опрацювання даних (геокодування, проведення контурів) з метою виокремлення пожеж і визначення їх характеристик (потужність, площа, матеріал горіння, природні або промислові об'єкти, на яких відбувається пожежа).

Другий розділ монографії містить огляд технологій і технічних особливостей розроблення картографо-аналітичної системи моніторингу викидів тепла і виявлення потенційно небезпечних пожеж. Він стосується не лише структури програмного коду її ядра та алгоритму його роботи, а й теоретичної складової, зокрема концепції розроблення програмного забезпечення для моніторингу природних явищ. У кількох підрозділах описано досвід моніторингу пожеж, набутий упродовж 2020—2022 років, зроблено спробу оцінити точність роботи цієї системи за допомогою порівняння зі статистичними даними Української державної бази авіаційної охорони лісів. Оскільки інформація про зафіксовані теплові аномалії доступна на сайті

NASA починаючи з листопада 1999 року, було виконано автоматизований пошук лісових пожеж за весь період спостережень.

Третій розділ присвячено технічним, науковим та прикладним аспектам обробки й аналізу супутникових даних щодо забруднення атмосферного повітря. Особливості обробки інформації розглянуто на прикладі супутника Sentinel-5 Precursor, проаналізовано основні помилки, що виникають при роботі з відповідними супутниковими даними, а також представлено автоматизовану систему оцінки якості атмосферного повітря на основі супутникових даних, розроблену в Українському гідрометеорологічному інституті (УкрГМІ) ДСНС України та НАН України. За допомогою цієї системи оцінено стан забруднення атмосферного повітря в Україні, починаючи від великих промислових центрів і закінчуючи віддаленими гірськими районами та заповідними територіями. Визначено роль різних джерел викидів та їх вплив на формування сезонних особливостей поля забруднення. Слід зазначити, що проведене порівняння рівнів забруднення атмосферного повітря в Україні та деяких інших країнах Європи дало досить неочікувані результати.

У четвертому розділі монографії наведено результати моніторингу пожеж і забруднення повітря, спричинених російським воєнним вторгненням на територію України. Описано дешифрувальні ознаки пожеж від бойових дій, тобто характерні особливості, які відрізняють їх від займань у мирний час. Розглянуто методику обрахування за даними супутникових спостережень кількості згорілих матеріалів, яка дає коректну оцінку збитків, завданих навколишньому середовищу внаслідок повномасштабної воєнної агресії РФ проти України, а також методику визначення забруднення атмосферного повітря в результаті активних бойових дій. Матеріали цього розділу переконливо доводять важливість та ефективність використання супутникового моніторингу і відповідних систем обробки й представлення даних. У складних умовах воєнного часу розроблені в УкрГМІ ДСНС України та НАН України системи моніторингу виявилися спроможними, незважаючи на серйозні виклики, надавати вкрай важливу для прийняття управлінських рішень інформацію щодо ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій, а іноді вони навіть були єдиним джерелом інформації про те, що відбувається в окремих районах.

Результати, опубліковані у цій монографії, було отримано в рамках виконання таких тем досліджень:

- двох тем конкурсної тематики Цільової програми наукових досліджень НАН України «Аерокосмічні спостереження довкілля в інтересах сталого розвитку та безпеки» (ERA-PLANET/UA) на 2021—2023 роки: «Розроблення системи моніторингу викидів тепла та виявлення потенційно небезпечних пожеж на основі супутникових даних» (0121U111523) і «Розроблення системи оперативного моніторингу забруднення ат-

мосферного повітря над містами України за супутниковими даними» (0121U111519);

- теми 9/21 на замовлення ДСНС України «Сучасні тенденції просторово-часового розподілу забруднюючих речовин в атмосфері над територією України на основі інтеграції даних вимірювань» на 2021—2023 роки (0121U109319);
- комплексної теми досліджень на замовлення НАН України «Розроблення багатоцільового геопорталу моніторингу та прогнозування стану навколишнього природного середовища» (0121U110153).

Розділ 1

ПРОСТОРОВИЙ І ЧАСОВИЙ РОЗПОДІЛ ВИКИДІВ ТЕПЛА ТА ВЕЛИКИХ ПОЖЕЖ ПО ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

1.1. Короткий огляд способів виявлення і моніторингу пожеж

У квітні 2020 року лісові пожежі охопили значні території в межах Житомирської і Київської областей, у липні — в Луганській області. Ці пожежі та їх масштаб, а також матеріальні й людські втрати актуалізували питання про наявність певних проблем у системі запобігання й ліквідації пожеж, які стосувалися, зокрема, своєчасного виявлення займань, моніторингу пожеж, контролю за процесом пожежогасіння, інформування населення про небезпечні ділянки.

Ключовим завданням для фахівців, які мають справу з виявленням, ліквідацією і моніторингом пожеж, є збирання геопросторових даних про займання. Такими даними є час і місце фіксації осередків пожежі, розміщення та назва географічного об'єкта, на території якого виникло займання, матеріал горіння (речовина, яка згорає). Важливі також умови навколишнього середовища, які впливають на перебіг пожежі. До них належать температура повітря, вологість ґрунту і матеріалу горіння, швидкість та характер вітру, наявність опадів. Сукупність цих факторів визначає рівень пожежної небезпеки. Пожежу характеризує також інтенсивність горіння, наявність осередків та їх кількість.

Отримати ці важливі дані про пожежу можна за допомогою методів, які умовно поділяють на дистанційні та контактні. Більш детальний опис методів виявлення пожеж наведено в оглядах [1, 2]. Найчастіше в практиці Державної служби України з надзвичайних ситуацій використовують класичний метод «контактного» отримання інформації — повідомлення від осіб, які перебувають поряд із місцем займання. Вони можуть безпосередньо описати пожежу або явища, які її супроводжують, зокрема задимлення, шум від горіння тощо, а тому цей спосіб є досить надійним. Власне до контактних методів можна віднести й отримання даних від сенсорів, встановле-

них на території потенційно небезпечних об'єктів, що стало можливим завдяки поширенню мережі мобільного зв'язку та появі так званого Інтернету речей (Internet of Things — IoT) [3].

Інша, принципово відмінна від попередньої, група методів збору інформації про пожежі ґрунтується на використанні даних, отриманих методом дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) за допомогою безпілотних літальних апаратів (дронів), літаків або штучних супутників Землі, оснащених різними видами знімальної апаратури. Ці методи послідовно описані в наукових працях [4—6].

Усі зазначені вище засоби дистанційного спостереження мають розміщуватися в зоні безпосередньої видимості пожежі, тобто над нею на значній висоті, оскільки енергія від пожежі виділяється у спектрі електромагнітного випромінювання, наближеного до видимого діапазону, для якого будь-які перешкоди є непрозорими. Зважаючи на це, повітряні літальні апарати можуть виявити пожежу за її опосередкованими ознаками (задимлення, наявність у повітрі нетипових домішок), а уточнити характеристики осередків можна вже в безпосередній близькості до місця займання. Штучні супутники Землі працюють інакше. Розміщені на *геліостаціонарній орбіті* (її також називають геліосинхронною, або сонячно-синхронною), вони сканують більшу частину поверхні Землі двічі на добу (через кожні 12 годин, орієнтовно на початку другої половини дня та опівночі). Якщо ж супутник розміщений на *геостаціонарній орбіті*, він «зависає» на точно визначеній висоті (40 тис. км) над поверхнею Землі у певній точці над екватором. Це ускладнює умови отримання даних про пожежу. Зокрема, для північних широт утворюється значна оптична перспектива, тобто кут поширення оптичних променів відрізняється від 90°. Крім того, для сканування доступна обмежена ділянка земної кулі. Проте у такого підходу є значна перевага — ця ділянка доступна для сканування в будь-який час, а тому період сканування задається довільно і може сягати кількох хвилин. Наприклад, у японського супутника Himawari-8 період часу між оновленнями даних становить 10 хв, однак у разі надзвичайної ситуації його можна зменшити до 2,5 хв [7].

Сучасні технології дозволяють проводити дистанційне зондування Землі в різних спектрах електромагнітного випромінювання: від радіохвиль до ультрафіолетового і рентгенівського діапазону. Найбільш задіяним на сьогодні є інфрачервоний спектр випромінювання, незважаючи на те, що зі збільшенням інтенсивності випромінювання енергії зростає частота самого випромінювання. Відповідно, під час інтенсивного горіння в оптичному діапазоні виділяється більше енергії, ніж в інфрачервоному. Проте оптичний діапазон уже зайнятий інтенсивним світінням сонця, тому випромінювання від пожежі вдень буде губитися на фоні яскраво освітленої місцевості. Водночас перевипромінювання інфрачервоних хвиль можливе тільки поверхнями, розігрітими до відносно високої температури (від 50—

60 до 400 °С). У помірних широтах за нормальних кліматичних умов природні тіла надзвичайно рідко розігріваються до такої температури [8], але на території пожежі інфрачервоне випромінювання від нагрітих об'єктів і вогню є більш інтенсивним на фоні навколишньої місцевості. Такі розігріті ділянки можна ідентифікувати як осередки пожежі.

Решта діапазонів електромагнітного спектра не так широко використовується для виявлення пожеж. Мікрохвильове сканування за допомогою пасивних мікрохвильових радіометрів з частотами 1,43; 13,3 і 37,5 ГГц дозволяє передусім визначити вологість лісу, ґрунту і підстилки. Більш детально про це йдеться в дослідженні [9]. Однак таке сканування слід проводити з відносно малої висоти (з літака або безпілотного літального апарата).

Опосередковано на великі пожежі вказують продукти горіння, які поширюються в повітрі. Під час горіння лісу деревина згорає не повністю, утворюючи не лише CO_2, а й монооксид вуглецю (CO). Також висока температура у місці горіння зумовлює окиснення азоту повітря з утворенням діоксиду азоту. Ніякі інші природні процеси не приводять до утворення цих газів у великих кількостях, а тому їх високу концентрацію можна вважати індикатором горіння. Виявити ці гази можна за допомогою спеціальних сенсорів. Водночас зазначені домішки під час поглинання сонячної енергії мають специфічний спектр випромінювання, за яким їх можна ідентифікувати з використанням спеціальних спектрометрів, розміщених на супутниках. Цей процес детальніше розглянуто в низці наукових праць, зокрема [10], а також у розділі 3 цієї монографії. Такий спосіб придатний для виявлення великих пожеж та оцінки їх масштабу, але дрібні займання з площею горіння порядку 1 га виявити ним складно.

Для повноти розуміння матеріалу слід зазначити, що процес моніторингу пожеж не обмежується виявленням лише наявних пожеж на різних стадіях їх існування за допомогою різних інструментів. Окремим і досить розгалуженим напрямом є різні види моделювання пожеж, зокрема з використанням математичних моделей. Наприклад, чимало фахівців досліджували конфігурацію та поширення контуру пожежі залежно від низки факторів: якісного складу і відносної вологості рослинного покриву ділянки, швидкості вітру тощо [11]. Короткий історичний екскурс у розроблення математичних моделей для пожеж наведено в роботі [12].

Ще одним досить поширеним напрямом досліджень є оцінка пожежної небезпеки залежно від погодних умов. Відомо, що займання часто виникають унаслідок антропогенної діяльності, однак у деяких випадках ці пожежі не згасають, а поширюються на досить великі території. Сприяють цьому певні погодні умови: відсутність упродовж тривалого часу значних опадів, висока температура повітря, швидкий поривчастий вітер [13, 14]. Для більш складних обчислень пожежної небезпеки і моделювання виникнення пожеж використовують також нейронні мережі [15].

Інший напрям досліджень пов'язаний з оцінюванням кількості пожеж та визначенням пошкоджень, завданих ними [16, 17].

Пожежна охорона в Україні поділяється на державну, відомчу, місцеву та добровільну. Гасіння великих займань, у тому числі й лісових, належить до компетенції підрозділів Державної служби України з надзвичайних ситуацій (ДСНС України). Моніторингом і гасінням невеликих лісових пожеж займається насамперед Державне агентство лісових ресурсів України. Як вже було сказано, ці інстанції використовують переважно контактні методи отримання інформації про пожежі, найчастіше з телефонних повідомлень від населення або осіб, відповідальних за певні ділянки та об'єкти, які перебувають у безпосередній близькості від пожежі. З огляду на те, що територія України є досить густозаселеною і добре освоєною в господарському плані, цей контактний спосіб збору даних є відносно надійним і на сьогодні залишається основним.

1.2. Історія розвитку супутникових методів тепловізійного сканування

Наприкінці 1950-х років бурхливий розвиток телебачення зумовив розширення досліджень з вдосконалення електронно-променевих трубок, зокрема появу відиконів та ортиконів. Це привело до створення чутливих і компактних датчиків, придатних для встановлення на штучних супутниках Землі. В 1960 році в США розпочалася програма TIROS (Television InfraRed Observation Satellite — телевізійний інфрачервоний супутник спостереження), яка передбачала виведення на орбіту Землі серії супутників [18]. У перших з них (TIROS-1 було запущено 1 квітня 1960 року) зображення формувалося за допомогою об'єктива та електронно-променевої трубки роздільною здатністю кілька сотень пікселів. Касетний накопичувач дозволяв записувати близько 32 зображень, які під час сеансу зв'язку передавалися на Землю. Всього за цією програмою з 1960 по 1965 рік було запущено 10 супутників, Радянські супутники серій «Космос» і «Метеор», які почали запускати з 1966 року, загалом мали аналогічну конструкцію. Крім відиконів, на їх борту були розміщені також прототипи скануючих радіометрів.

Наступний етап у тепловізійних дослідженнях земної поверхні розпочався орієнтовно в 1970-х роках. На той час рівень розвитку електроніки дозволяв виготовляти надчутливі датчики з низьким рівнем шуму для випромінювання в різних спектрах — від радіочастот (десятки й сотні мегагерців), включаючи мікрохвилі (одиниці гігагерців), інфрачервоного (теплового) випромінювання (сотні гігагерців) до ультрафіолетового і рентгенівського спектрів. Не маючи технологічної можливості створювати для сенсорів матриці з високою роздільною здатністю, фахівці вирішили проблему отримання високодетальних зображень за допомогою «скануючого» променя. Один із способів реалізації цієї технології полягав у застосуванні

об'єктива, кількох призм або модулюючого диска і спеціального дзеркала, що оберталося. Об'єктив забезпечував фокусування, довгі вузькі призми відігравали роль щілини, яка формувала вузьку смугу зображення (умовно один ряд пікселів), а дзеркало, обертаючись, із лінійного зображення, яке потрапляло на нього, утворювало точкове (один піксель) і спрямовувало його на єдиний чутливий сенсор. Ряд вибірок даних із сенсора, синхронізованих з обертанням дзеркала, дозволяв створити високодеталізоване зображення у потрібному спектрі. Такі скануючі спектрорадіометри були встановлені на супутниках серій ITOS (США), Meteosat (Європейське космічне агентство), Метеор (СРСР).

З кінця 1970-х років найбільш досконалим приладом для тепловізійних спостережень став AVHRR — Advanced Very High Resolution Radiometer (удосконалений радіометр із дуже високою роздільною здатністю). Його було встановлено на полярно-орбітальних екологічних супутниках (POES) програми TIROS-N/NOAA [19]. AVHRR має сенсори для видимого, ближнього інфрачервоного та теплового інфрачервоного діапазонів, призначені для зйомки хмар і визначення властивостей поверхні. Згодом застосування AVHRR розширилося, його почали використовувати для отримання даних про температуру поверхні моря, розподіл аерозолів, для визначення індексу рослинності, виявлення вогню, диму тощо. Перший AVHRR з 4-канальним радіометром було встановлено на борту космічного апарата TIROS-N, запущеного в 1978 році. Потім прилад удосконалили до 5-канального AVHRR/2, який спочатку використовувався на супутнику NOAA-7 (запущений у червні 1981 року). Остання версія AVHRR/3 має 6 каналів і вперше була встановлена на супутнику NOAA-15 (травень 1998 року). Два його канали сканування спрямовані на отримання даних у червоній (0,6 мкм) та ближній інфрачервоній (0,9 мкм) ділянках спектра, третій — на довжину хвилі 3,5 мкм, а ще два — на теплове випромінювання планети, тобто приблизно на 11 і 12 мкм. Головний недолік конструкції радіометра AVHRR — кут сканування 45°, який був замалим порівняно з 110° у сучасних сенсорів, проте його роздільна здатність була не набагато гіршою — в останніх модифікаціях вона досягала 1,1 км на піксель у найнижчій точці супутника. Ще один істотний недолік AVHRR полягав у неможливості калібрування сенсорів на Землі, а тому його доводилося здійснювати вже після виведення приладу в космос. Висота орбіти супутників становила 833 або 870 км.

Ці дані вже були доступні для «просунутих аматорів», знайомих із радіоелектронікою. Згідно з міжнародними конвенціями, всі метеорологічні дані є відкритими, а тому сигнали супутника NOAA не закодовані, і відтак, доступні для прийому та опрацювання. Найпростіший та загальнодоступний аналоговий сигнал формату APT (Automatic Picture Transmission) використовується для передачі зображень Землі з космосу і має частоту 137 МГц. Крім того, супутники передають зображення у форматі високої

роздільної здатності HRPT (High-resolution Picture Transmission) на частоті 1,7 ГГц. Для прийому даних у форматі HRPT потрібно мати поворотну антену, хороший підсилювач і декодер HRPT, тоді як для APT-формату достатньо радіоантени, недорогого приймача і комп'ютера з лінійним аудіовходом. Отриманий файл у форматі WAV можна легко декодувати за допомогою програми, написаною на Python.

Сучасний етап у дослідженні теплових аномалій на земній поверхні розпочався із запуском супутника Terra, який відбувся 18 грудня 1999 року. Революційним виявився не стільки сам датчик теплових аномалій MODIS, скільки спосіб надання користувачам інформації про результати його роботи — відтепер дані передавалися у зручному для подальшого опрацювання форматі. Відпала необхідність збирати власноруч установку для прийому даних, завантажувати великий масив даних лише в певний час, коли вони були доступні, самостійно виконувати фільтрацію сирих даних — вони вже надавалися у вигляді готових точкових об'єктів із географічними координатами. Для отримання даних достатньо було зареєструватися на сайті [20] і оформити безкоштовну підписку. Відповідно, будь-який фахівець, який володіє ГІС-технологіями, міг опрацьовувати дані про теплові аномалії. Вони були не дуже детальні, територія сканувалася лише один раз на добу, однак чутливості було достатньо для виявлення займання на сільськогосподарському угідді або в лісовому масиві площею від 10 м^2.

Слід зупинитися на більш детальному описі орбіти супутників. Багатонаціональний науково-дослідницький супутник EOS AM-1 (Terra) обертається в напрямку з півночі на південь на близькополярній сонячно-синхронній орбіті на висоті 705 км. Кут огляду його оптичної підсистеми становить 110°, що на такій висоті забезпечує ширину смуги огляду 2330 км. Сонячно-синхронна (геліо-синхронна) орбіта дозволяє йому сканувати майже всю поверхню Землі двічі за добу (рис. 1.1), за винятком вузьких сегментів в екваторіальних і тропічних широтах. Зазначені ділянки покриваються майже щодня, оскільки супутник проходить над однією і тією ж точкою на екваторі один раз на 16 днів. Terra виконує сканування не в обід, а у вранішні години, оскільки система спостереження NASA розрахована на присутність на орбіті кількох супутників. Відповідно, є доцільним, щоб вони покривали ділянки Землі у різний час. Над екватором супутник Terra проходить орієнтовно о 10:30 (так званий низхідний вузол), а над територією України з'являється орієнтовно о 11:17 (рис. 1.2). Дані сканування передаються на наземні станції, розміщені в Уайт-Сандс, штат Нью-Мексико, через супутникову систему відстеження та передачі даних (TDRSS). Потім їх надсилають до системи даних та операцій EOS (EDOS) у Центрі космічних польотів Годдарда, де й відбувається їх опрацювання. З цього випливає, що дані про теплові аномалії з'являються у доступі не відразу. Між скануванням і появою даних минає значний час — від 2 до 4 годин.

Рис. 1.1. Покриття поверхні Землі космічними знімками супутника Terra

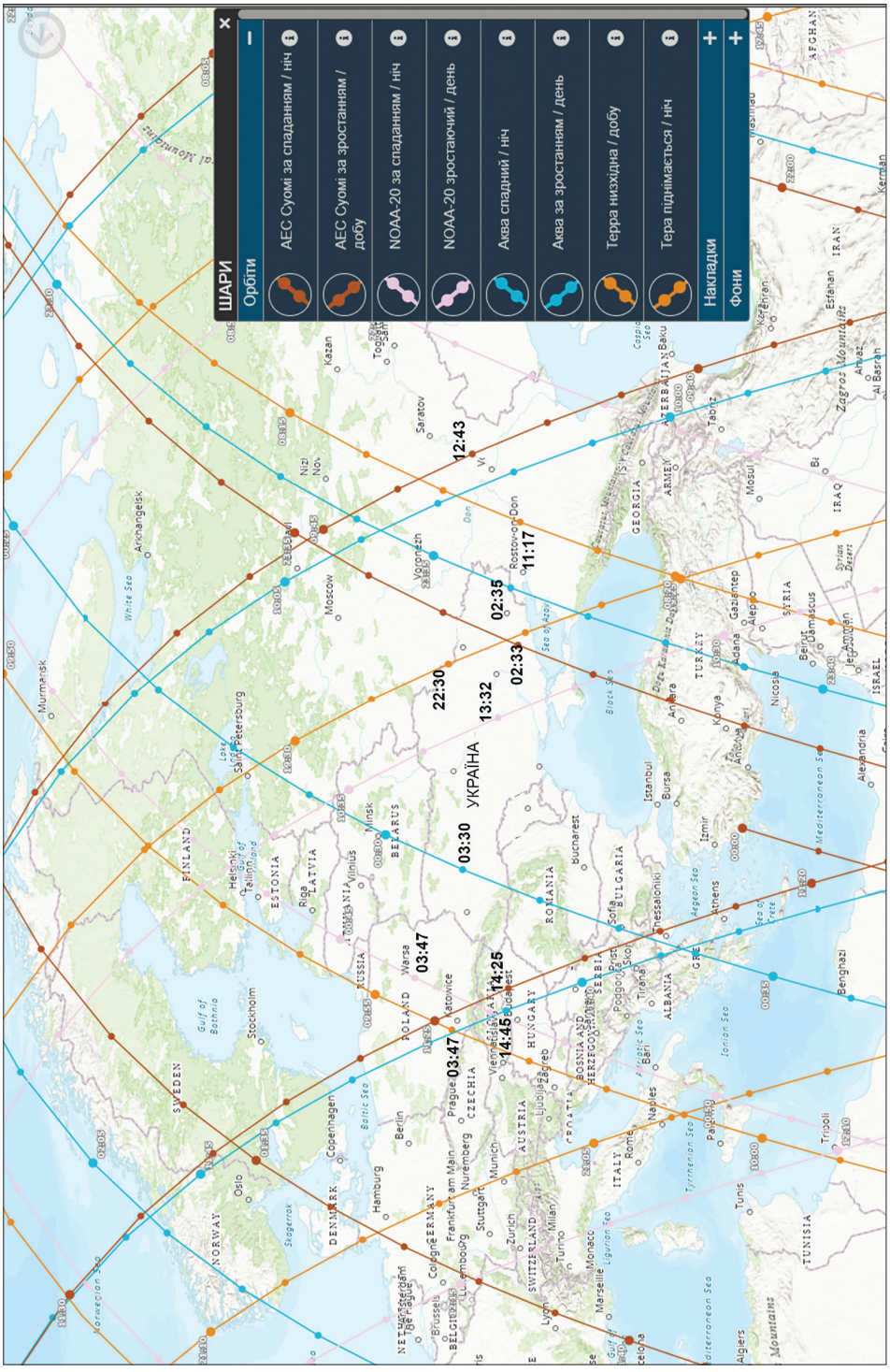


Рис. 1.2. Картосхема прольоту супутників над територією України із вказанням часу сканування

Крім спектрорадіометра середньої роздільної здатності MODIS, супутник Terra несе корисне навантаження ще з чотирьох датчиків:

- ASTER — створює чітке зображення поверхні Землі;
- CERES — сканує хмари та енергетичну систему випромінювання Землі;
- MISR — багатокутовий спектрорадіометр;
- MOPITT — вимірює забруднення в тропосфері.

Із запуском 4 травня 2002 року аналогічного супутника Aqua збільшилася частота сканувань — тепер одна й та сама ділянка в помірних широтах потрапляла на датчики двічі на добу, о 11:17 і о 14:30.

Спектрорадіометр MODIS був розроблений компанією Santa Barbara Remote Sensing за специфікаціями, наданими NASA впродовж 1995—1999 років. Він фіксує дані в 36 спектральних діапазонах з довжиною хвилі від 0,4 до 14,4 мкм, і відповідно, роздільна здатність для цих діапазонів є різною: для двох діапазонів вона становить 250 м на один піксель, для п'яти діапазонів — 500 м на піксель, для 29 діапазонів розмір пікселя — 1 км у масштабі місцевості. Для визначення теплових аномалій використовують 20—23 діапазони з довжиною хвилі від 3,6 до 4,08 мкм. Дані на сенсор потрапляють за допомогою двостороннього дзеркала, яке обертається зі швидкістю 20,3 об/хв перпендикулярно напрямку польоту супутника. Відповідно, зафіксовані теплові аномалії розміщуються в комірках матриці, орієнтованої не вздовж меридіанів або паралелей, а навскіс, зі значним кутом — від 20 до 65° залежно від значення широти, над якою пролітає супутник. Поблизу екватора кутова швидкість обертання Землі відносно супутника менша, ніж у полярних широтах.

Оптична система MODIS складається з дводзеркального позаосьового афокального телескопа, який спрямовує енергію на чотири рефракційні об'єктиви, по одному для кожної з областей спектра, щоб охопити загальний спектральний діапазон від 0,4 до 14,4 мкм. Фотодіодно-кремнієва технологія зчитування для видимого та ближнього інфрачервоного діапазонів забезпечує низький рівень шуму при динамічному діапазоні у 12 біт. Сенсор сприймає температуру від 300 К, тобто понад 26,85 °С, (для одного із діапазонів — від 335 К). Це дозволяє фіксувати не лише пожежі, а й розігріті поверхні значної площі.

Більш детально про датчик MODIS можна прочитати на спеціалізованому вебсайті [21] та в інструкції користувача [22].

Майже через 10 років, 28 жовтня 2011 року, фахівці NASA запустили космічний апарат Suomi NPP, оснащений більш досконалим сенсором VIIRS. Середня висота супутника Suomi NPP над поверхнею Землі становить 829 км, період обертання — 102 хв, тобто 14 обертів навколо Землі впродовж доби. Крім VIIRS, на супутнику встановлено й інші інструменти (CrIS, OMPS, ATMS і CERES), призначені переважно для вимірювання атмосферних змінних і радіаційного балансу Землі.

Датчик VIIRS на борту супутника Suomi NPP перетинає екватор приблизно о 13:30 (висхідний вузол) та о 1:30 ранку (низхідний вузол), а такий самий датчик на борту супутника NOAA-20 перетинає екватор приблизно на 50 хв раніше — о 12:40 вечора (висхідний вузол) та 12:40 ранку (низхідний вузол).

Інструмент VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite) має ширину смуги сканування 3060 км, яка здатна забезпечити повне покриття Землі впродовж половини доби. Він може збирати дані в 22 різних спектральних діапазонах електромагнітного спектра з довжинами хвиль від 0,412 до 12,01 мкм. Просторова роздільна здатність датчика залежить від смуги електромагнітного спектра: 17 смуг мають деталізацію 750 м на піксель, інші 5 смуг, у тому числі й спектр теплових аномалій (3,973—4,128 мкм) — 375 м на один піксель [23]. Решта характеристик, таких як спосіб сканування, розміщення матриці пікселів [24] тощо, подібні до приладу MODIS.

18 листопада 2017 року на орбіту було виведено супутник NOAA-20 з аналогічним сенсором. 10 листопада 2022 року запущено NOAA-21. Супутник NOAA-21, подібно до NOAA-20, має на борту такі прилади: VIIRS, CrIS, ATMS і OMPS.

Відповідно, на сьогодні для моніторингу пожеж переважно використовують 5 штучних супутників Землі: Terra, Auqa, Suomi NPP, NOAA-20 і NOAA-21. Точно розрахувати їхні орбіти і визначити час, коли ці космічні апатати проходять над територією України, можна за допомогою ресурсу N2YO.com [25].

1.3. Принцип і технологія виявлення теплових аномалій за допомогою супутникових інфрачервоних сканерів

Найбільш дієвим способом боротьби з пожежами, в тому числі й лісовими, є своєчасне їх виявлення та вжиття заходів із пожежогасіння. Використання одночасно кількох незалежних методів збору даних може значно підвищити надійність та повноту отримуваної інформації про пожежі. Особливо це стосується виявлення пожеж на ранніх стадіях на практично незаселених територіях: заповідниках, заказниках, лісових угіддях. Найбільш придатними з точки зору їхньої практичної реалізації є методи, засновані на автоматичному опрацюванню супутникових спостережень.

Штучні супутники Землі, оснащені термосканерами, разом з іншими даними можуть передавати координати та кількісні значення виявлених теплових аномалій на поверхні Землі.

Викиди тепла, або теплові аномалії, — це джерела на земній поверхні, які мають вищу (на 20 °C і більше) температуру порівняно з навколишньою територією. Відповідно, ці розігріті поверхні більш інтенсивно випромінюють енергію в інфрачервоному спектрі з довжиною хвилі від 3,6 до 4,08 мкм,

Рис. 1.3. Викиди тепла на Криворіжсталі, 2020 рік

а отже, ці джерела можна легко ідентифікувати на фоні теплового випромінювання з більшою довжиною хвилі для решти території.

Як правило, теплові аномалії спричинюють осередки відкритого вогню і розігрітого до високої температури матеріалу горіння (речовини, яка підтримує вогонь у пожежі). Однак супутники можуть фіксувати джерела тепла без відкритого вогню. Часто устаткування на промислових підприємствах під час роботи виділяє значну кількість тепла. Наприклад, процес виробництва цементу пов'язаний з випалюванням вихідної сировини за температури близько 1500 °С. При цьому сама піч досить велика за розмірами, і попри наявність багатошарової теплоізоляції випромінює назовні багато тепла. Так само добре фіксуються викиди тепла на металургійних і коксохімічних комбінатах (рис. 1.3). А труби теплоелектростанцій мають невелику площу і викидають газ порівняно невисокої температури, який не може їх сильно розігріти. Тому методами ДЗЗ теплоелектростанції практично не фіксуються.

Мінімальна потужність теплового випромінювання, необхідна для фіксації об'єкта як теплової аномалії, становить 200 кВт, або 0,2 МВт. Таку кількість енергії виділяє приблизно 2 м^2 поверхні, суцільно вкритої відкри-

тим вогнем, чи невелика копиця сіна, якщо вона вся охоплена полум'ям. Значення, менші за 0,2 МВт, відбраковуються, оскільки перебувають нижче рівня шуму сенсора VIIRS. Інакше кажучи, сенсор досить часто фіксує хибні «викиди тепла» потужністю 0,1— 0,2 МВт, які мають різну природу, наприклад, зумовлені іонізованим газом усередині сенсора. Особливості оброблення сигналу, отриманого термосканером, як і наявність повторних сканувань, а також порівняння даних із кількох сенсорів не розкриваються в офіційних джерелах. Відомо лише, що для якісної роботи здійснюється калібрування сенсора. Для сенсора MODIS мінімальні значення виділення енергії перебувають на рівні 0,8—1 МВт.

Отже, щоб джерело проявило себе як теплова аномалія, воно має випромінювати більше енергії, ніж мінімальне значення, яке фіксує той чи інший сенсор, а також має повністю потрапити на комірку віртуальної матриці сенсора. Розмір цієї комірки було зазначено вище (довжина становить 375 м для VIIRS і приблизно 1 км для MODIS). Зазвичай джерело тепла має більший розмір і фіксується на кількох сусідніх пікселях віртуальної матриці сканування.

Наприклад, горіння сухої трави відбувається, як правило, на досить великій площі (до кількох квадратних кілометрів), але є розтягнутим вздовж довгого контуру і через невеликі запаси горючої речовини розвивається з меншою інтенсивністю. Втім, таке займання супутникові сенсори можуть зафіксувати (рис. 1.4). В інший спосіб відбувається займання у сільськогос-

Рис. 1.4. Займання трави біля м. Вуглегірськ і відповідні викиди тепла

Рис. 1.5. Викиди тепла на фермерському полі

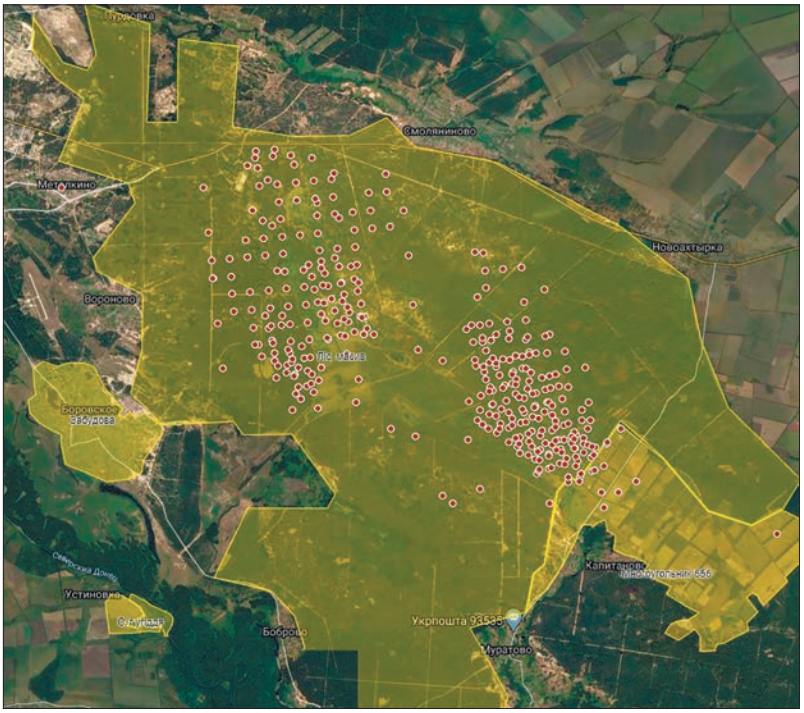


Рис. 1.6. Лісова пожежа в Луганській області

подарських угіддях. Для прискорення процесу фермери часто підпалюють залишки агросировини одночасно в кількох місцях, і висока інтенсивність горіння дозволяє зафіксувати множинні теплові аномалії на порівняно невеликій площі (рис. 1.5). Найбільш інтенсивними є викиди тепла від горіння лісу, яке, по суті, являє собою об'ємну пожежу і має значні запаси горючої сировини. Лісова пожежа супроводжується сильним випромінюванням в інфрачервоному спектрі, яке чітко фіксують термосканери супутників (рис. 1.6).

Геліостаціонарна орбіта супутників передбачає їх проліт над територією двічі на добу, приблизно в один і той самий час відносно півдня або півночі. На відміну від оптичних сканерів, термосканери можуть фіксувати займання в темну пору доби. Проте впродовж кількох років моніторингу пожеж було виявлено, що тривала пожежа вночі фіксується з дещо меншою інтенсивністю. Це можна пояснити зниженням температури навколишнього середовища і, відповідно, меншою інтенсивністю випромінювання тепла самою пожежею.

Супутники фіксують теплові аномалії лише пролітаючи над ними, тобто впродовж кількох секунд. Тому, якщо пожежа виникла пізніше, вона залишиться непоміченою аж до часу наступного сканування. При цьому не важливо у світлий чи у темний час доби здійснюється проліт над територією.

Усі дані, отримані від супутників, мають просторово-часову прив'язку, тобто координати супутника в просторі в момент зйомки можна вираховувати за значенням часового коду, оскільки орбіта космічного апарата розраховується з високою точністю. Сервери NASA обробляють отримані дані з метою відбракування помилкових спрацювань сенсорів супутника через відблиски сонця, а також здійснюють просторову прив'язку даних у системі координат WGS-1984, і лише після цього вони стають доступними для користувачів[1]. Зафіксовані термоточки мають низку інших характеристик (які ще називають атрибутами), такі як дата і час фіксації, назва космічного апарата, який її виявив, потужність викиду тепла, а також технічні характеристики — теплова яскравість на сенсорі, ряд і колона в масиві, рівень довіри та ін. Ці дані вже можна відобразити на карті.

1.4. Просторовий розподіл викидів тепла по території України. Природні та антропогенні фактори, які впливають на нього

Дані термографічних супутникових спостережень, як вже зазначалося у попередньому розділі, мають координати для кожної виявленої теплової аномалії. Якщо зробити їх вибірку за певний, досить тривалий період спостережень, скажімо, за рік, і нанести на карту, то можна помітити, що ви-

[1] Оброблені супутникові дані доступні для завантаження за посиланням: https://firms2.modaps.eosdis.nasa.gov/active_fire/#firms-txt

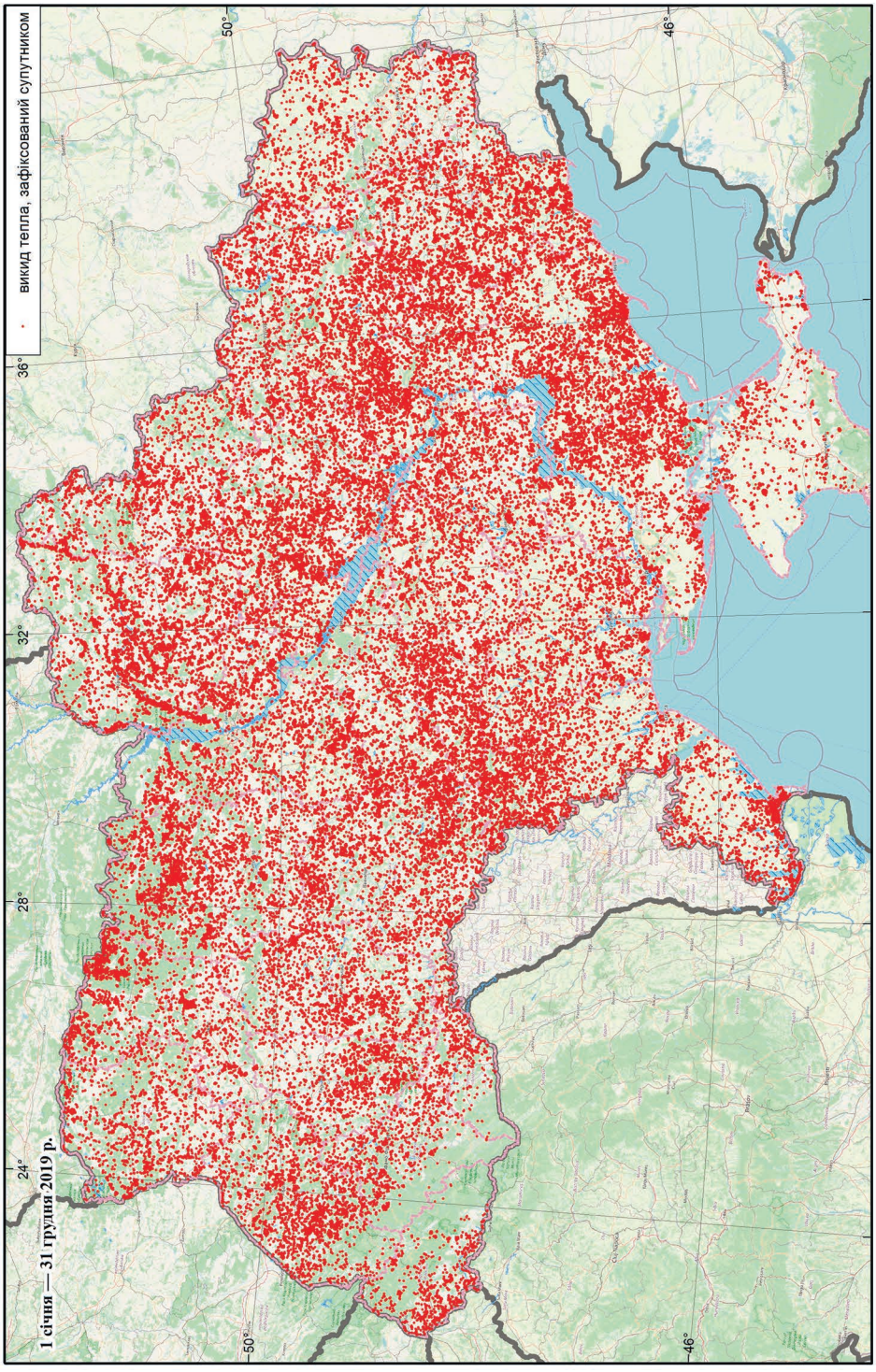


Рис. 1.7. Викиди тепла, зафіксовані на території України в 2019 році

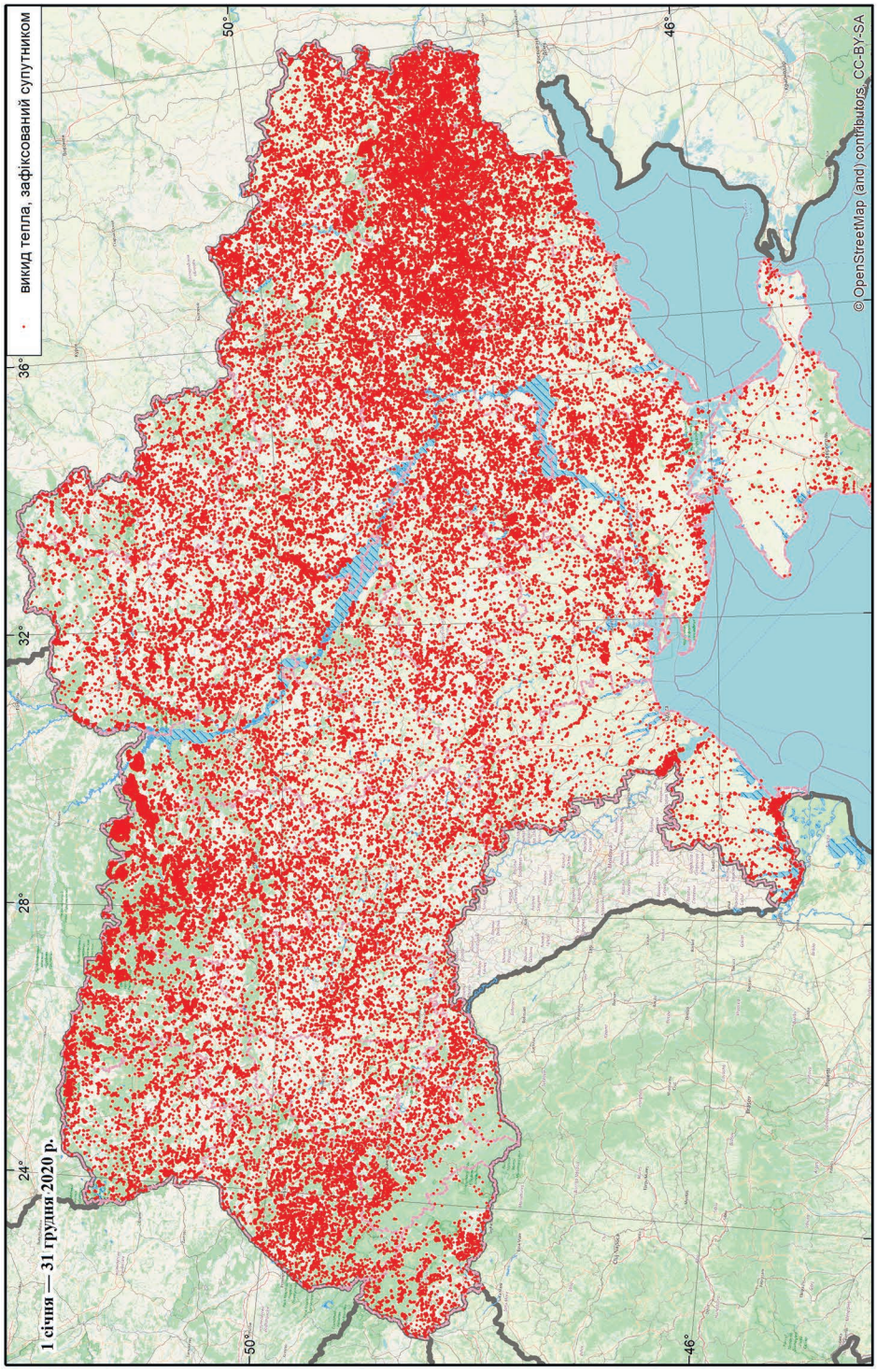


Рис. 1.8. Викиди тепла, зафіксовані на території України в 2020 році (всього 214)

киди тепла фіксуються майже на всій території України. Винятком є окремі ділянки у Карпатах, Кримських горах, деяких заповідниках, тобто в тих районах, у яких практично немає господарської діяльності людини і які перебувають під охороною (рис. 1.7—1.8).

Аналізуючи карти виявлених теплових аномалій за всі роки спостережень, не можна однозначно виокремити фізико-географічні райони або адміністративні області, в яких найбільше і найчастіше фіксуються викиди тепла, однак можна констатувати, що на території Автономної Республіки Крим і в Закарпатській області їх, як правило, менше. Це не пов'язано з промисловим використанням території, оскільки в цьому разі викиди тепла групувалися б окремими «островами» навколо промислових підприємств. Імовірно, на кількість викидів тепла впливає певний спосіб ведення господарської діяльності, який є поширеним майже на всій території України, крім зазначених вище регіонів. Таким видом діяльності є землеробство, адже відомо, що територія України розорана практично повністю. Відносно меншу густоту викидів тепла в Криму можна пояснити спалюванням відходів сільськогосподарського виробництва переважно не на полях, а у твердопаливних котлах і печах для опалення будинків. Це зумовлено відсутністю в цій місцевості традиційних видів палива (деревини, вугілля) і, відповідно, їх високою вартістю через необхідність доставки з інших регіонів.

На карті України викиди тепла можуть накладатися один на одного через дрібний масштаб. Це певною мірою спотворює їх реальний розподіл по території країни. Для отримання більш чіткої картини потрібно всю досліджувану територію поділити на відносно невеликі кластери однакової площі і підрахувати кількість викидів тепла, що потрапляють на кожний з них, а потім провести класифікацію отриманих кластерів. Результати цієї роботи наведено на рис. 1.9, з якого видно, що найбільше викидів тепла спостерігалося на територіях, охоплених лісовими пожежами у квітні 2020 року. На карті в різних регіонах є також одиничні кластери з численними викидами тепла — це ділянки, на яких розміщуються коксохімічні, металургійні та інші великі промислові підприємства. До таких належать Запоріжсталь (м. Запоріжжя); Криворіжсталь (м. Кривий Ріг Дніпропетровської області); Азовсталь і Маріупольський металургійний комбінат імені Ілліча (м. Маріуполь Донецької області); Івано-Франківськцемент (с. Ямниця Івано-Франківської області); Авдіївський коксохімічний завод (м. Авдіївка Донецької області); Волиньцемент (м. Здолбунів Рівненської області); Дніпровський металургійний комбінат і Дніпровський коксохімічний завод (м. Кам'янське Дніпропетровської області); Ясинівський коксохімічний завод (м. Макіївка Донецької області); Єнакієвський металургійний завод (м. Єнакієве Донецької області); Побузький феронікелевий комбінат (с. Побузьке Кіровоградської області); Нікопольский завод феросплавів (м. Нікополь Дніпропетровської області); Алчевський коксохімічний завод

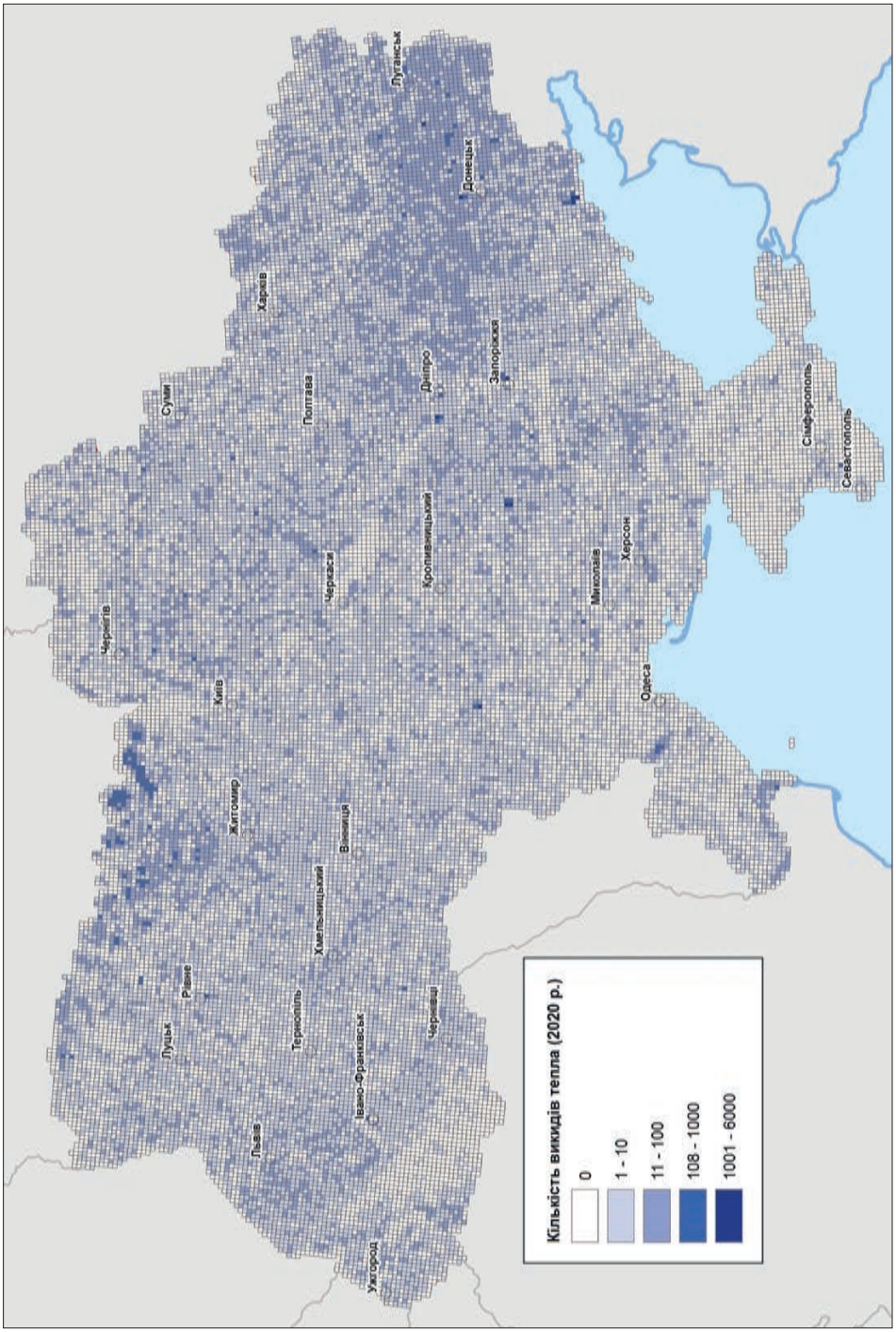


Рис. 1.9. Кількість викидів тепла на території України в 2020 році

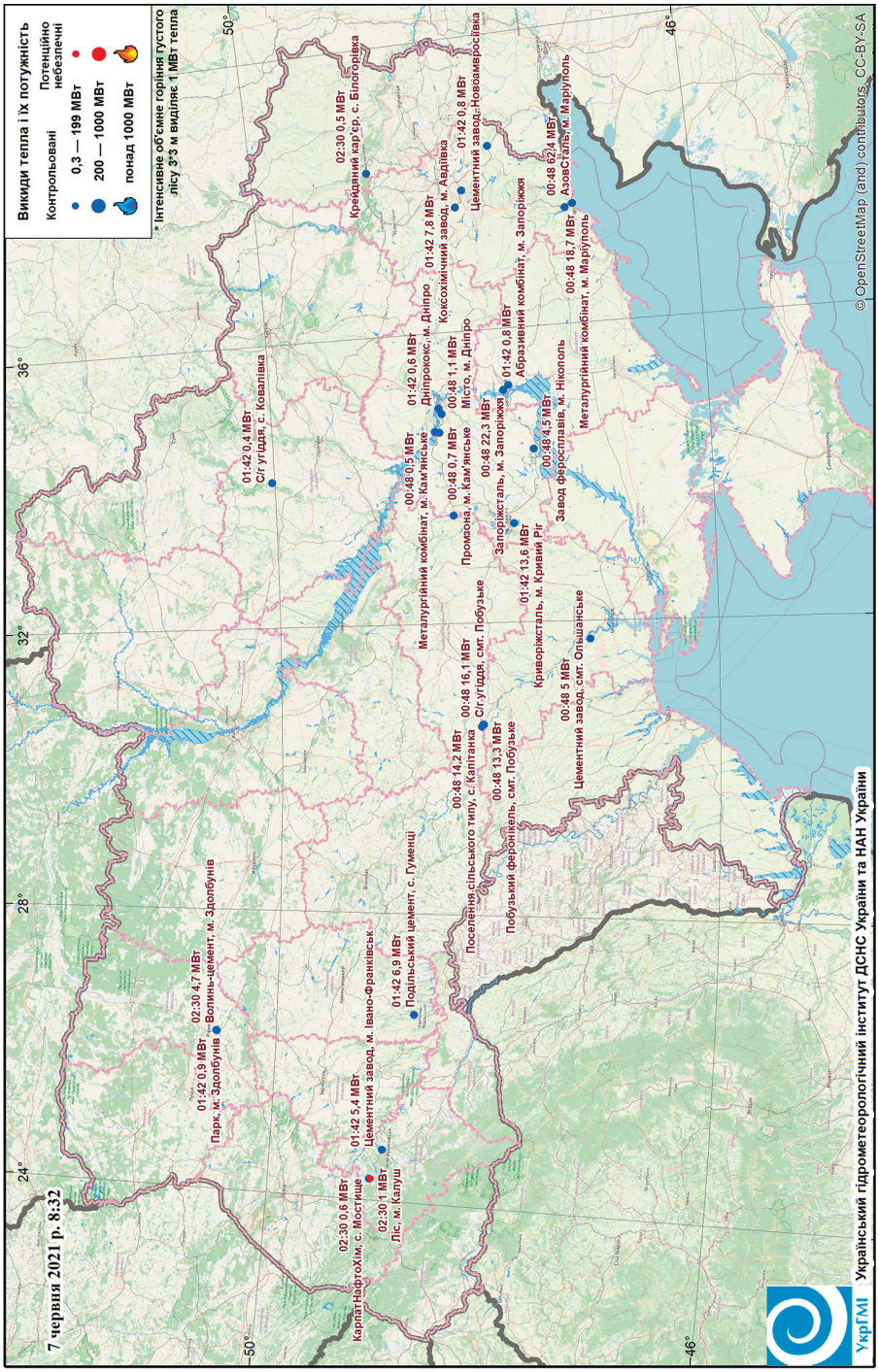


Рис. 1.10. Викиди тепла на промислових підприємствах за відсутності інших теплових аномалій

(м. Алчевськ Луганської області) та багато інших. На цих підприємствах викиди тепла трапляються регулярно — супутники фіксують їх практично щоденно (рис. 1.10).

Однак ці карти не дають можливості встановити чітку візуальну кореляцію між кількістю викидів тепла і рослинним покривом. Теплові аномалії фіксуються як на залісених і частково залісених ділянках, так і на полях. Практично немає викидів тепла на територіях населених пунктів, особливо великих міст, а також на деяких фермерських угіддях. Проте з рис. 1.7—1.8 чітко видно, що майже на всій території України спостерігаються численні осередки викидів тепла, що пов'язано з масовим спалюванням населенням тих чи інших видів відходів. Подібний спосіб ведення господарства становить проблему, оскільки негативно позначається на екологічній ситуації і підвищує ризик виникнення масштабніших пожеж.

Ще одним показником, який варто дослідити, є потужність теплових аномалій, тобто кількість енергії, яку випромінювало займання під час його фіксації супутником. Кількісно оцінити потужність займань можна з карти, наведеної на рис. 1.11. На ній викиди тепла, зафіксовані протягом 2020 року, класифіковано за потужністю. Всього виділено три типи термоточок: від мінімально доступної для фіксації потужності 0,2 МВт до 4,9 МВт. Їм відповідають невеликі за площею (одночасного горіння) займання, від 1 м^2 до приблизно 50 м^2, лісові і в 2—3 рази більші за площею займання лучної рослинності, а також переважно всі теплові викиди промислових підприємств. Промислові викиди є менш інтенсивними, оскільки відкритого вогню в них немає, а є лише гарячі поверхні, а отже, теплове випромінювання від них істотно менше, ніж від пожежі. Їх показано на карті зеленим кольором. Зосередження зелених точок вказує на спалювання соломи невеликими господарствами або на контрольоване спалювання невеликих обсягів відходів.

Пожежі від 5 до 50 МВт вже становлять небезпеку для населення і промислових об'єктів, але їх можна назвати умовно локальними. Одна їх частина спричинена скоординованим спалюванням решток сільськогосподарської продукції на полях, інша — невеликими займаннями в лісових масивах, які проте виділяють досить значну кількість тепла через об'ємність пожежі. На карті їх небагато (показані жовтим кольором).

Найбільш небезпечними є викиди тепла потужністю понад 50 МВт. Кілька таких термоточок, розташованих поряд, видно на космічних знімках середньої роздільної здатності, зроблених супутниками NASA. Для них характерний помітний димовий шлейф, який може охоплювати 1—2 % площі адміністративної області. На карті помітно, що такі термоточки (їх позначено червоним кольором) зосереджені досить компактними групами. Особливо їх багато на півночі Київської і Житомирської, а також в Донецькій, Луганській і Дніпропетровській областях. Подібні термоточки вказують, як

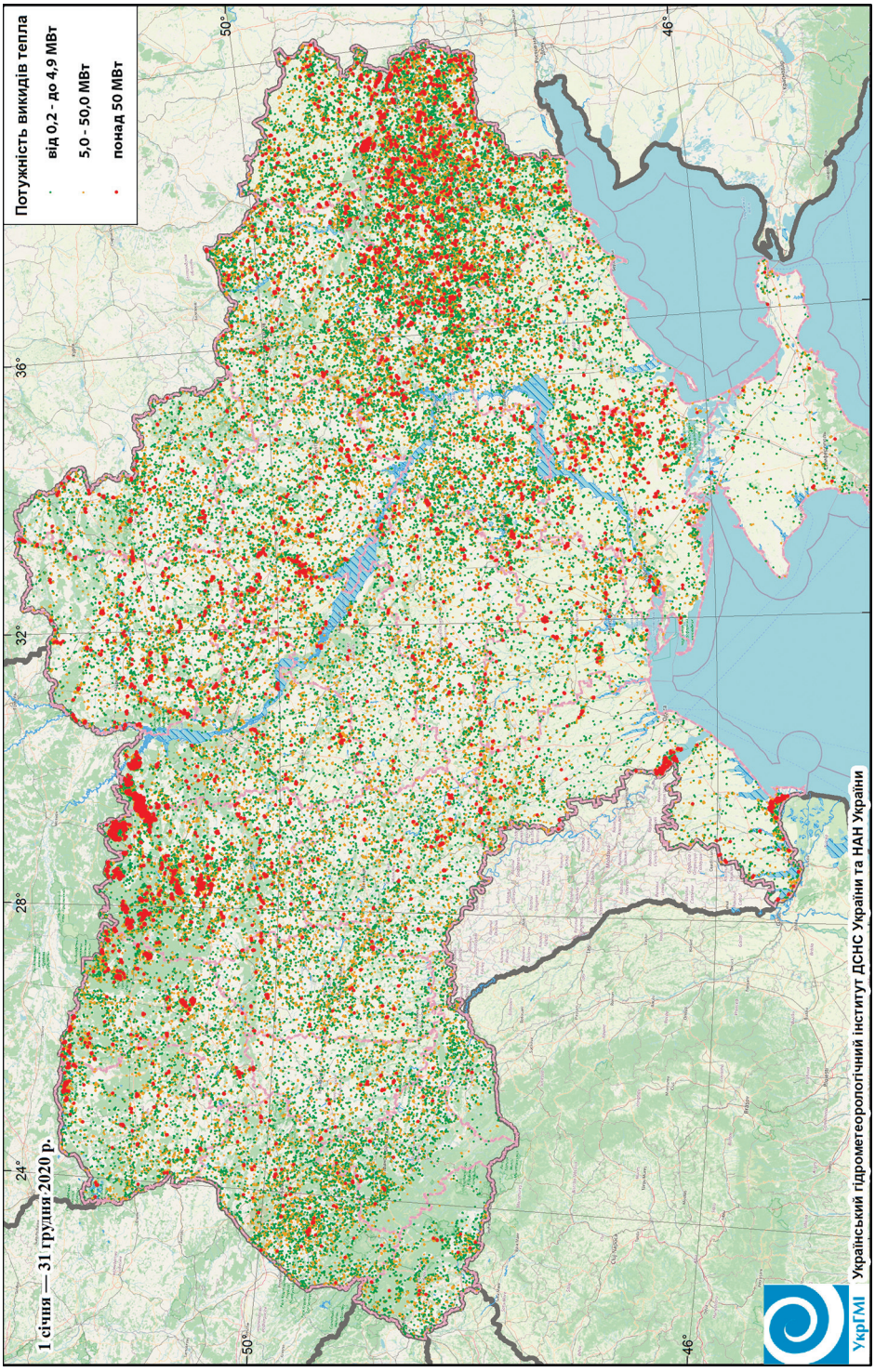


Рис. 1.11. Просторовий розподіл викидів тепла по території України у 2020 році з відображенням потужності викидів

правило, на великі пожежі, які тривають кілька днів та висвітлюються у засобах масової інформації.

Карту на рис. 1.12 складено за методикою, подібною до описаної вище, але з тією різницею, що в межах кластера оцінювали сумарну потужність теплових аномалій. Після проведення підрахунку виявилося, що максимальну сумарну потужність мають кластери на територіях Житомирської та Луганської областей, де в 2020 році відбувалися великі лісові пожежі. Пікові значення спостерігаються також у місцях розташування великих промислових підприємств. Ці максимуми потужностей викидів тепла цілком зрозумілі, але є географічні об'єкти, на територіях яких фіксується багато потужних викидів тепла, природа яких не така очевидна. Це, наприклад, заплава річки Дністер у місці її впадання в Дністровський лиман, частина якої належить Національному природному парку «Нижньодністровський» і має природний трав'яний покрив (господарська діяльність тут не здійснюється). Крім того, численні викиди тепла зафіксовано у верхній дельті Дунаю. Ця територія також не освоєна в господарському плані і частково вкрита лісами листяних порід. Така сама ситуація спостерігається і на території заплави річки Сула й нижче за її течією, поблизу м. Лубни. Це заболочена місцевість з трав'яним покривом. Поруч розташований гідрологічний заказник «Онишківський». Вирізняється й територія поблизу ландшафтного заказника місцевого значення «Бориспільські острови», на захід від м. Переяслав, берег річки Дніпро. Прикладів таких об'єктів можна навести ще кілька. Спільним для них є розташування на «незайманих» землях, поряд із природоохоронними територіями. Цілком імовірно, що пожежі, які фіксуються в цих екосистемах, виникають унаслідок незаконної діяльності людини, а неосвоєність територій призводить до втрат часу від займання до початку ліквідації пожежі.

На особливу увагу заслуговує карта (рис. 1.13), на якій відображено сумарну потужність викидів тепла, підраховану в межах компактних ділянок території, зайнятих однотипною рослинністю (однаковий покрив земної поверхні). Всього виділено 6 типів покривів, які з урахуванням асоціацій позначено різними кольорами:

- водні об'єкти (річки, озера, водосховища) — синій;
- залісені території — темно-зелений;
- сільгоспугіддя — коричневий;
- болота — темно-жовтий;
- луки і степ — фіолетовий;
- забудовані території (населені пункти) — червоний.

Сумарну потужність зафіксованих упродовж року викидів тепла відображено насиченістю відповідного кольору:

- 0 (для всіх типів землекористування) — білий;
- 0,09—100 МВт — 25 % максимальної насиченості;

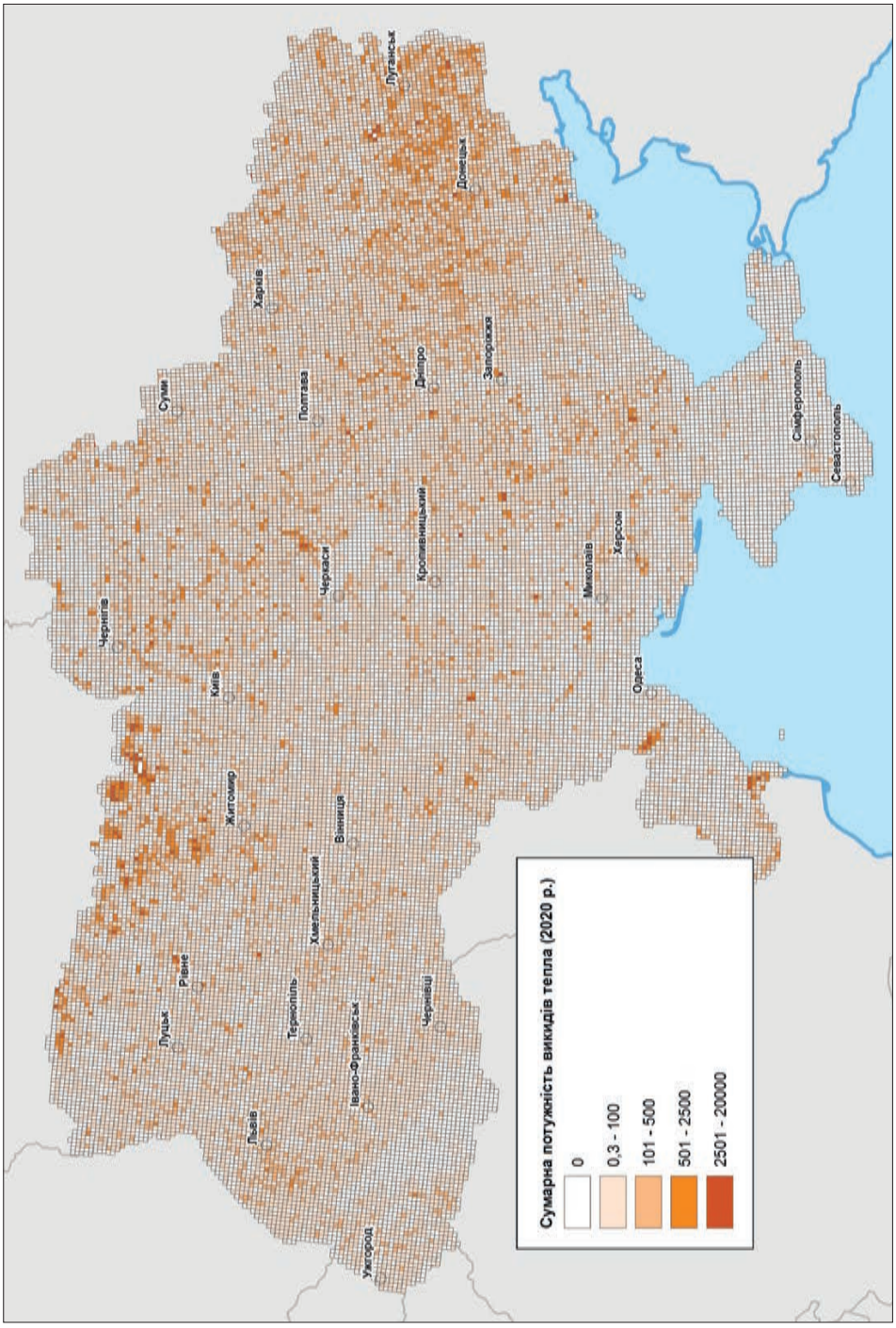


Рис. 1.12. Сумарна потужність викидів тепла на території України в 2020 році

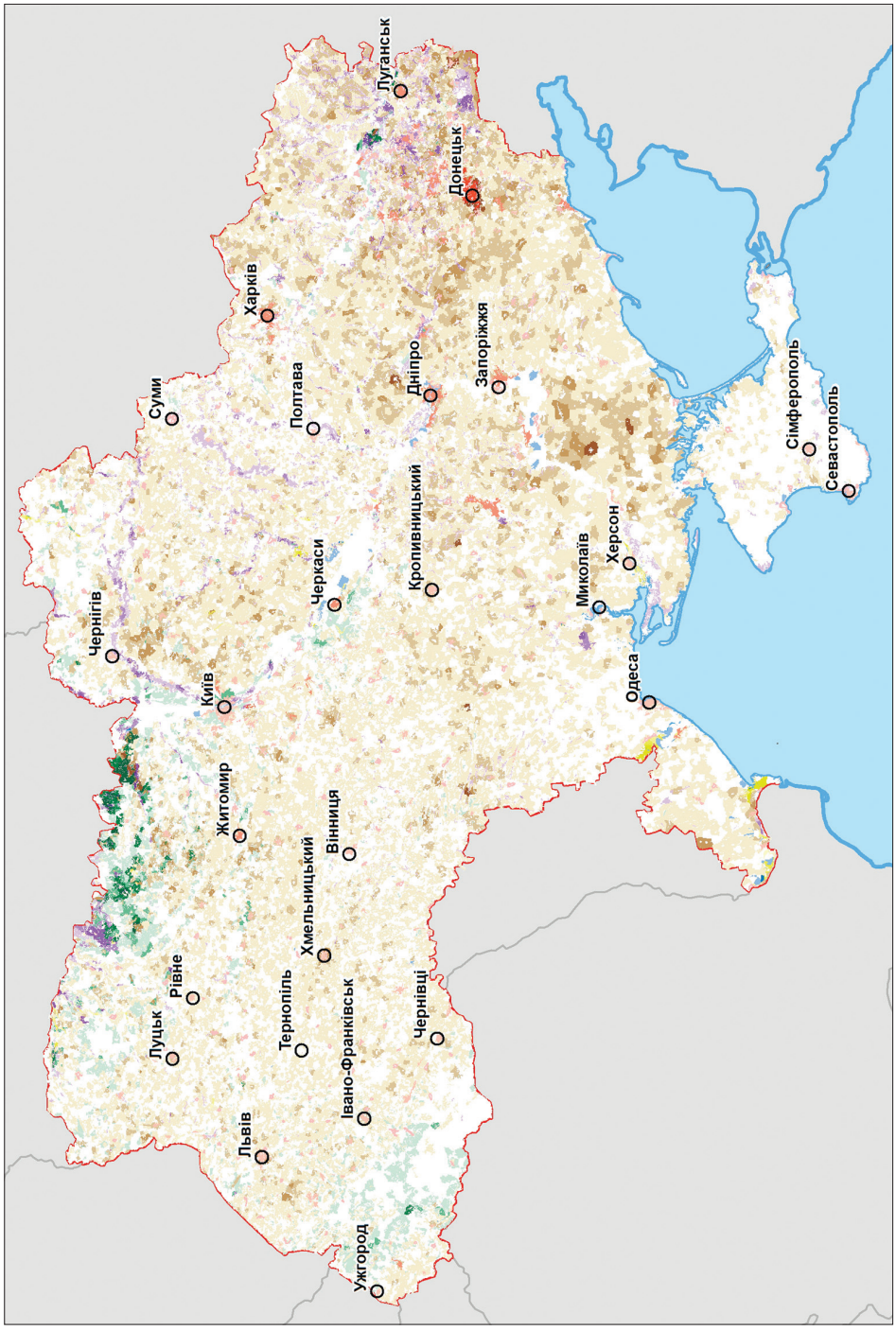


Рис. 1.13. Сумарна потужність викидів тепла за покривом земної поверхні в 2020 році

- 101—500 МВт — 50 % максимальної насиченості;
- 501—2 500 МВт — 75 % максимальної насиченості;
- понад 2 500 МВт — повнокольорова заливка.

Аналізуючи цю карту, можна дійти висновку, що найбільші за площею викиди тепла спостерігаються на територіях сільгоспугідь, але в деяких угіддях теплові викиди практично відсутні, а в інших — фіксується їх значна потужність. Це може свідчити про різний підхід до ведення господарської діяльності на цих територіях. Серед лісових кластерів вирізняються окремі інтенсивно зафарбовані (темно-зелений колір) ділянки, які вказують на сильні пожежі, які відбулися раніше, а також на потенційну небезпеку розведення на них вогню. Також є зони (фіолетове забарвлення), в яких спостерігаються часті займання трав'яного покриву. Можна помітити, як фіолетові ділянки утворюють певні «доріжки», які «дивним чином» збігаються із заплавами річок, що може свідчити про інтенсивну «рекреаційну» діяльність на їх берегах. Луки через неприбутковість цього типу землеволодінь займають порівняно невеликі площі, тому й господарська діяльність на них ведеться не інтенсивно, а отже, немає потреби у спалювання залишків продукції.

1.5. Часовий розподіл викидів тепла по території України і фактори, які впливають на нього

Дослідження часового розподілу кількості та потужності зафіксованих викидів тепла здійснювалося лише для останніх років, тобто для 2019—2021 рр. 2022 рік є нетиповим, насамперед через російську широкомасштабну воєнну агресію, тому цю тему винесено в окремий, четвертий, розділ. Для виявлення характеру часового розподілу теплових аномалій застосовано кілька методів наукового пошуку. Перший із них полягає в щоденному аналізі супутникових даних і моніторингу пожеж за цими даними. Він дозволив виявити, зокрема, пожежі в заповідниках, сплески займань у вихідні дні. Наприклад, останні не простежуються на картах, створених для тривалого періоду спостережень (місяця, кварталу або року). Нанесені на карту викиди тепла дали змогу оцінити їх зосередження та більш детально проаналізувати відповідні ділянки місцевості.

Поденний розподіл теплових аномалій, проаналізований впродовж тижневих зрізів даних, дозволив виявити першу часову особливість. Вона пов'язана з рекреаційною діяльністю, описаною у підрозділі 1.4, і часто приводила до неконтрольованих займань. Дійсно, супутники фіксують процес «відпочинку» місцевого населення. Кількість викидів тепла значно зростає у вихідні дні, особливо за хорошої теплої погоди, найбільше — на травневі свята. Багаття, розведені відпочивальниками у прилісовій зоні, навіть надчутливі термосканери VIIRS не повинні були б фіксувати через їх малу потужність. Для порівняння: викид тепла від багаття становить порядку

10—30 кВт, тоді як мінімальна потужність для фіксації термосканерами — 200 кВт. Відповідно, можна зробити припущення про наявність на цих ділянках численних багать або розведення потужних вогнищ, хоча більш імовірним видається виникнення локальних займань унаслідок не до кінця догорілих вогнищ. На карті пожеж у неділю 11 квітня 2021 року (рис. 1.14) в поле зору термосканера супутника потрапило також спалювання відходів сільськогосподарського виробництва (соломи) або бур'янів, але не в агрохолдингах, а в невеликих домогосподарствах. На територіях сільгоспугідь найбільш інтенсивно цей процес відбувається навесні, оскільки солома перешкоджає потраплянню зерна у ґрунт і його проростанню. Тому цілком можливо ця особливість пояснюється спалюванням стерні на невеликих землеволодіннях, власники яких вирішили використати вихідний день і хорошу погоду для очищення своїх ділянок. Агрохолдинги зазвичай спалюють солому поступово, найчастіше наприкінці літа і восени, відразу після збирання врожаю. Отже, можна зробити висновок, що локальне в часі зростання кількості теплових аномалій у погожі вихідні дні зумовлене передусім спалюванням стерні власниками невеликих землеволодінь, а також багаттями, розведеними відпочивальниками. На рис. 1.15 наведено карту викидів тепла, зроблену на кілька днів раніше, 8 квітня 2011 року. На ній викидів тепла спостерігається в десятки разів менше, хоча погодні умови практично не змінилися.

Помісячний розподіл теплових аномалій також має певні особливості. Було виявлено, що в січні викиди тепла фіксуються лише на промислових підприємствах. Низька температура повітря сприяє охолодженню розігрітих агрегатів, тому на знімки потрапляють лише потужні підприємства, температура поверхонь яких навіть у холодну погоду перевищує 45 °C.

У лютому спостерігається подібна картина, однак теплових аномалій істотно більшає. Переважну їх частину зафіксовано в останніх числах місяця. Ймовірно це пов'язано зі спалюванням решток сільськогосподарських рослин, які залишилися на полях після сходження снігу і достатньо висохли для горіння. Кількість викидів тепла в лютому суттєво змінюється з року в рік, що зумовлено різними погодними умовами.

Так само погодні умови впливають і на ситуацію в березні. Спалювання відходів сільськогосподарських виробництв доповнюється викидами тепла від вогнищ, які розпалюють відпочивальники. Саме в березні потужні викиди тепла фіксуються на луках і болотах, поблизу заповідних територій і великих населених пунктів.

У квітні досить чітко простежується географічна тенденція: у північних областях України кількість викидів тепла є набагато більшою, ніж у південних регіонах. Це зумовлено сходженням снігу і висиханням приземної рослинності саме в цей період, тоді як у південних регіонах це відбувається на місяць раніше.

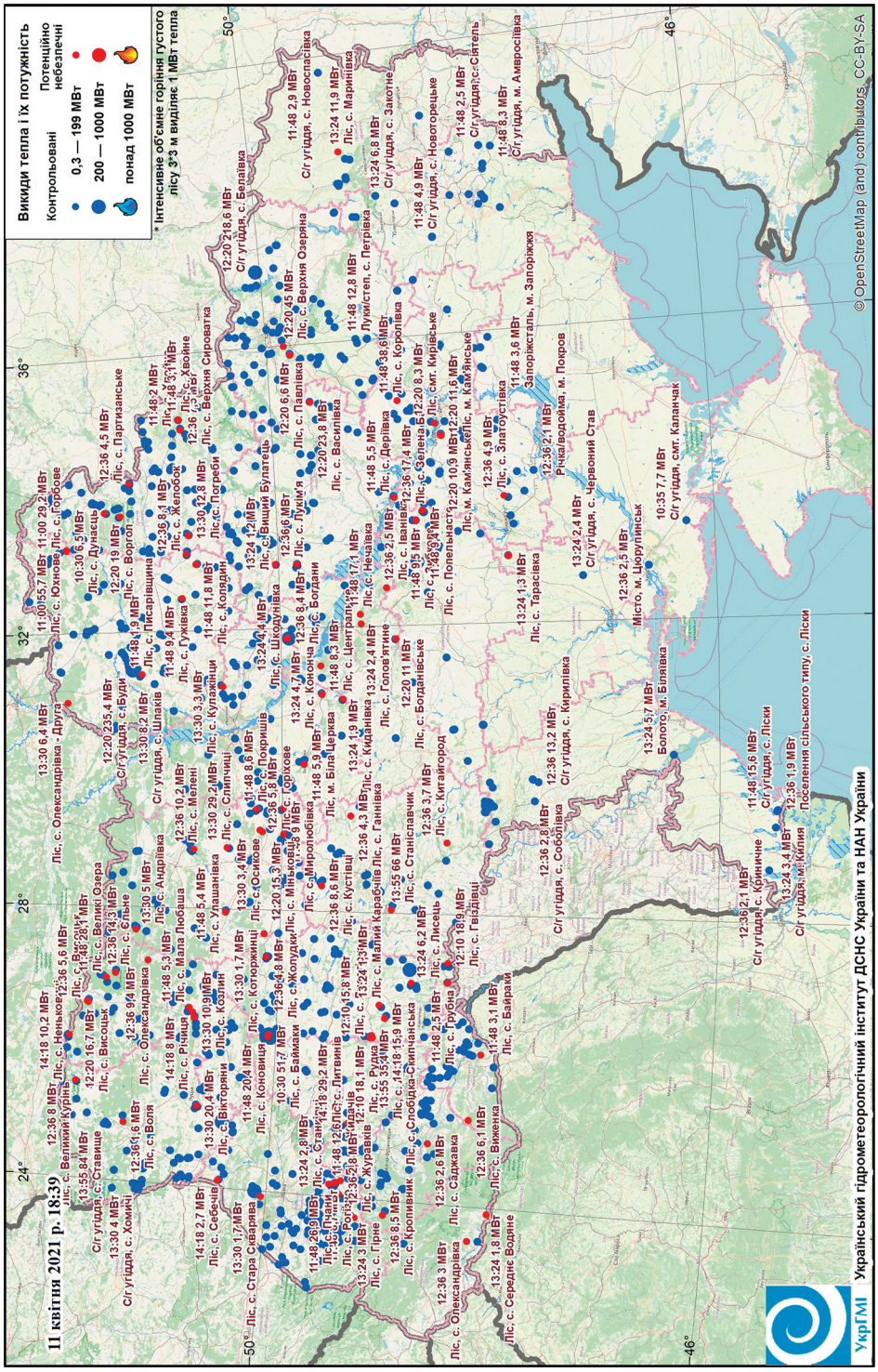


Рис.1.14. Карта пожеж у вихідний день 11 квітня 2021 року. Червоним позначено пожежі поблизу або в межах лісових масивів

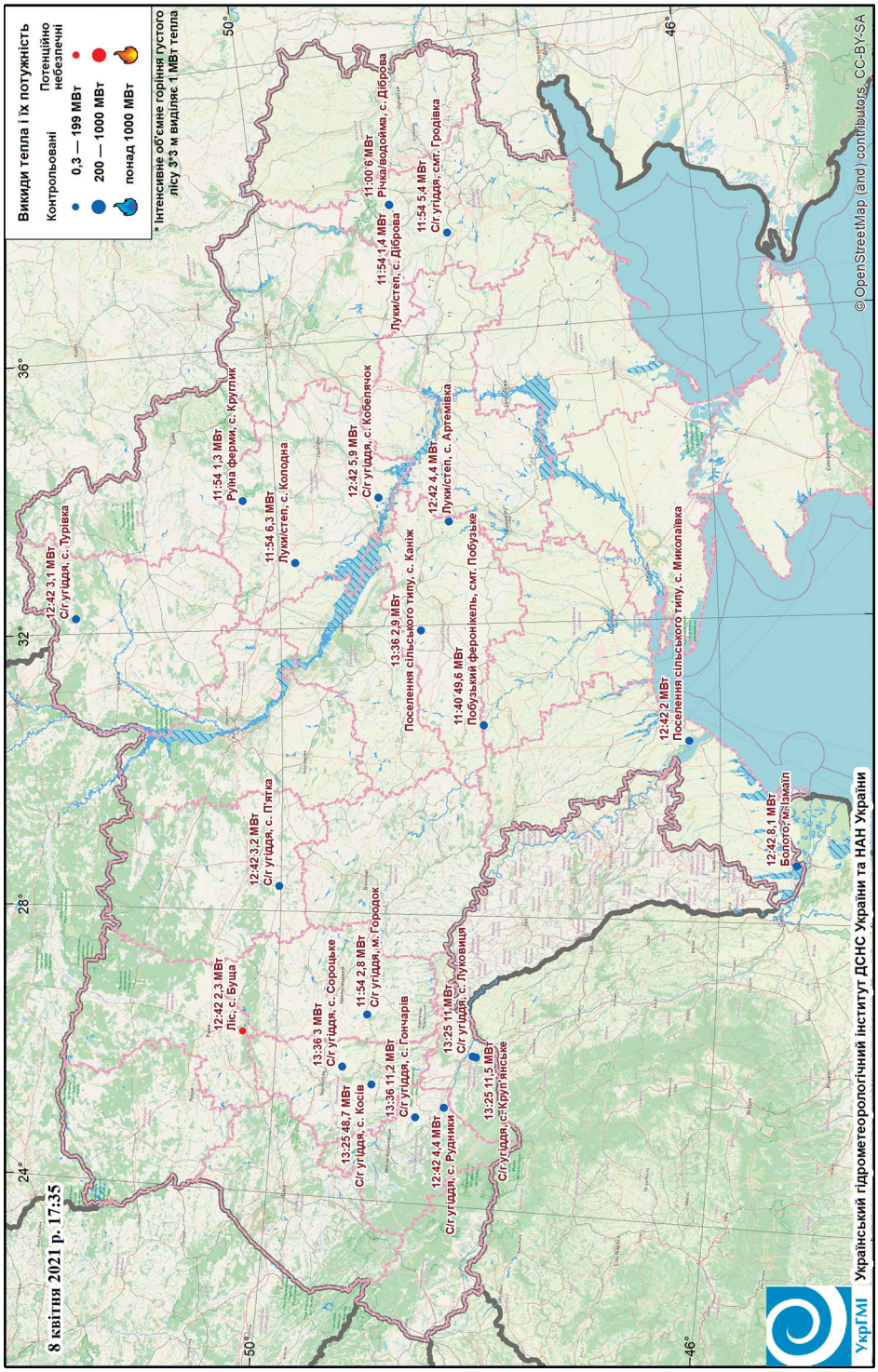


Рис.1.15. Карта пожеж у робочий день (четвер) 8 квітня 2021 року

У травні та червні займань майже не спостерігається, оскільки підготовка полів завершена і всі вони вже засіяні. Фіксуються лише поодинокі викиди тепла, які мають різне походження.

Ситуація в липні практично обернена до квітня — більшість викидів тепла фіксуються в південних областях. Найчастіше їх причиною є засушлива погода, і відповідно, високий рівень пожежної небезпеки, тобто найменше займання будь-якої природи може призвести до значної пожежі. Рідше займання спричинені діями фермерів, які в цей період уже завершили збір озимих культур. Висока потужність займань на сільськогосподарських угіддях пояснюється великою кількістю відходів, зібраних у відносно компактні ряди.

У серпні викиди тепла переміщуються на північніше і охоплюють північну і центральну частини України.

У вересні займання спостерігаються переважно на тих самих територіях, що й у серпні, однак кількість їх меншає, ймовірно, через зростання хмарності, яка знижує кількість теплового випромінювання, що доходить від поверхні Землі до супутників, а також через дощову погоду, яка не сприяє процесам горіння.

Жовтень для України традиційно є сухішим (інколи теплішим), ніж вересень. У цьому місяці завершується збирання всіх видів зернових і посів озимих культур, здійснюється підготовка полів до наступного сезону, а тому фермери часто спалюють стерню. Останнім часом, унаслідок зміни клімату, в жовтні частіше спостерігається аномально суха погода з характерною для неї високою пожежною небезпекою. Такі погодні умови можуть спричиняти значні займання сухого матеріалу, в тому числі й лісові пожежі.

Листопад в Україні переважно вологий і прохолодний. У цьому місяці кількість викидів тепла суттєво зменшується, трапляються вони переважно в лісостеповій зоні центральної частини України.

У грудні кількість теплових аномалій є мінімальною, викиди тепла фіксуються здебільшого на великих промислових підприємствах і від потужних локальних займань.

Кількість викидів тепла за місяцями в період 2019—2021 років наведено в табл. 1.1.

Річний розподіл кількості теплових аномалій можна схарактеризувати так:

- 2001 рік — викиди тепла на території України були сконцентровані переважно у південній, центральній і східній частинах країни;
- 2002 рік — зменшення кількості викидів тепла на Західній Україні і в Донецькій, Луганській та Херсонській областях;
- 2003 рік — загальне зменшення кількості викидів тепла, здебільшого вони фіксувалися в лісовій і лісостеповій зонах;
- 2004 рік — концентрація викидів тепла в центральних областях, менша їх кількість на Правобережному Поліссі і в Закарпатській області;

• 2005 рік — значно зросла кількість викидів тепла, але фіксувалися вони в тих самих регіонах, що й у попередньому році;

• 2006 рік — кількість викидів тепла була середньою між 2004 і 2005 роками;

• 2007 і 2008 роки — ситуація була подібною до 2006 року, однак збільшилася концентрація викидів тепла на Правобережному Поліссі;

• 2009—2011 роки — чітких тенденцій немає, викиди тепла були розсіяні досить рівномірно, проте спостерігалося деяке зниження їх концентрації в північних областях;

• 2012 рік — викиди тепла сконцентровані в Передкарпатті (Львівська, Івано-Франківська, Чернівецька області);

• 2013 рік — помітне зосередження займань у Львівській області;

• 2014 рік — викиди тепла концентрувалися переважно на межі лісостепової і степової зон, особливо вирізнялися заплава р. Десна і найпівнічніша частина русла Дніпра; були наявні ядра концентрації пожеж у Київській, Житомирській і Рівненській областях;

• 2015 рік — викиди тепла майже рівномірно розосереджені на території України;

• 2016 рік — концентрація викидів тепла зростає з півночі на південь;

• 2017 рік — концентрація викидів тепла зростає з північного заходу на південний схід;

• 2018 рік — невелике зростання відносно попереднього року;

• 2019 рік — ядра концентрації викидів тепла у Рівненській, Житомирській, Київській, Чернігівській, Одеській областях;

Таблиця 1.1

Кількість зафіксованих викидів тепла за місяцями в 2019—2021 роках

Календарний місяць	Кількість викидів тепла		
	2019	2020	2021
Січень	124	2 180	437
Лютий	3 485	2 812	661
Березень	13 181	48 510	8 193
Квітень	26 665	59 774	10 771
Травень	1 980	3 255	5 001
Червень	4 616	5 864	4 775
Липень	23 624	24 059	14 259
Серпень	17 795	30 053	29 756
Вересень	13 949	21 236	10 604
Жовтень	16 293	14 509	15 376
Листопад	4 778	1 652	—
Грудень	1 343	738	—

• 2020 рік — потужні лісові пожежі в Луганській, Житомирській, Рівненській, Київській областях;

• 2021 рік — ядра концентрації викидів тепла у Запорізькій, Одеській, Херсонській областях.

Аналіз наведеної в цьому підрозділі інформації дозволяє зробити деякі висновки. По-перше, немає чіткої просторової концентрації викидів тепла на певній частині території. По-друге, кількість теплових аномалій залежить від параметрів погоди та ступеня пожежної небезпеки. По-третє, більшість викидів тепла пов'язані з діяльністю агрогосподарств, які спалюють відходи свого виробництва. По-четверте, найбільша кількість викидів тепла фіксується зазвичай у березні-квітні, липні-серпні та у жовтні, найменша — у грудні-січні.

1.6. Виявлення пожеж і визначення їх якісних та кількісних критеріїв за супутниковими даними

Лісові пожежі, пожежі на луках та в сільськогосподарських угіддях належать до небезпечних явищ, які завдають значних матеріальних збитків і призводять до людських втрат. Удосконалення методики моніторингу ландшафтних пожеж в Україні є надзвичайно актуальним і пріоритетним завданням, оскільки, як засвідчили масштабні пожежі останніх років, є певні проблеми в системі запобігання та ліквідації пожеж, які стосуються, зокрема, їх своєчасного виявлення і класифікації.

Класифікація пожеж передбачає встановлення факту виникнення пожежі, визначення її типу (лісова, степова тощо) і потужності займання на момент фіксації. Два перші пункти (виявлення і визначення типу) потребують застосування чітких якісних критеріїв пожежі, а останній (потужність займання) — кількісних критерії.

Як уже зазначалося вище, дані для моніторингу пожеж на території України ми отримуємо з п'яти супутників NASA — Terra, Aqua, NOAA-20, NOAA-21 і Suomi NPP. Результати теплового сканування, що надає сервер NASA, не містять будь-якої інформації про географічний об'єкт, на якому виявлено займання. Тобто у цих даних відсутня інформація про матеріал горіння, характер рослинного покриву, просторові характеристики об'єкта, на якому зафіксовано викид тепла, назву об'єкта, взаємозв'язки з іншими викидами тепла і, що найголовніше, про належність зафіксованого викиду тепла до масштабної пожежі. Сервер NASA не виконує визначення цих характеристик через великий обсяг теплових аномалій, які щоденно фіксуються по всій земній кулі. Проте для виявлення та дослідження пожеж ці відомості є надзвичайно важливими, тому що дозволяють перейти від розгорнутих даних про теплові аномалії до характеристик пожеж, а також правильно їх ідентифікувати.

Зокрема, зосередження викидів тепла на невеликій ділянці місцевості вказує на наявність пожежі, з огляду на тип рослинності характеризує її небезпеку, а збіг даних від кількох супутників свідчить про тривалий час горіння, як мінімум 2—4 години, впродовж якого відбулося кілька фіксацій. До того ж тип горючого матеріалу (деревина, трава) дає змогу ідентифікувати пожежу як контрольовану (для займань у межах сільськогосподарських угідь) або неконтрольовану (пожежі в природних екосистемах). Підрахунок суми потужностей викидів тепла в межах пожежі допомагає визначити інтенсивність горіння. Компактне розміщення викидів тепла дає можливість правильно окреслити її контур по крайнім термоточкам. Насамкінець всі ці дані можна відобразити на космофотокарті пожежі для отримання з неї вичерпної інформації. Адже пожежі, відзняті на всій території країни, класифіковані й нанесені на географічну карту, дають змогу профільним фахівцям швидко і наочно оцінити пожежну ситуацію в Україні.

Для складання таких карт після завантаження даних з сервера їх потрібно додатково опрацювати — виконати геокодування і генералізацію викидів тепла. *Геокодування* — це визначення назви і типу географічного об'єкта, на якому зафіксовано теплову аномалію. Викиди тепла на металургійному заводі чи в аграрному господарстві, чи в лісовому масиві супутник сприймає однаково, а тому за одними лише характеристиками потужності не можна достовірно встановити джерело викиду тепла або його характер. Крім того, вкрай бажано встановити населений пункт, поблизу якого виявлено викид тепла, а також знати, чи є в межах цього просторового об'єкта інші теплові аномалії. Необхідно розрахувати й сумарну потужність викидів тепла, зафіксованих у межах кожного просторового об'єкта (а їх на території Україні зазвичай десятки тисяч).

Наприклад, на рис. 1.16 показано одну з перших зафіксованих за допомогою супутникової зйомки пожеж. По растру видно, що вона відбулася на слабко залісеній місцевості. На території під займаннями немає ніяких промислових об'єктів. Для таких детальних карт важливо показати розміщення викидів тепла, тоді як все займання подають контуром із текстовими написами, які повідомляють користувачеві карти характеристики всієї пожежі.

Інакше складають карти моніторингу пожеж (рис. 1.17). Для визначення кількох десятків об'єктів із тепловими аномаліями, які фіксуються щодня, потрібно виконати багато маніпуляцій. На початку дослідження теплових аномалій такі карти отримували переважно з виконанням ручних операцій. Згодом було написано програмне забезпечення, яке дозволило автоматизувати процес. Більш детально про це йдеться у розділі 2.

Отже, групам викидів тепла, які розташовані компактно, ставлять у відповідність точкові умовні позначення, які розміщують по центру цих груп. Для цих умовних позначень вибирають засіб картографічного зображення,

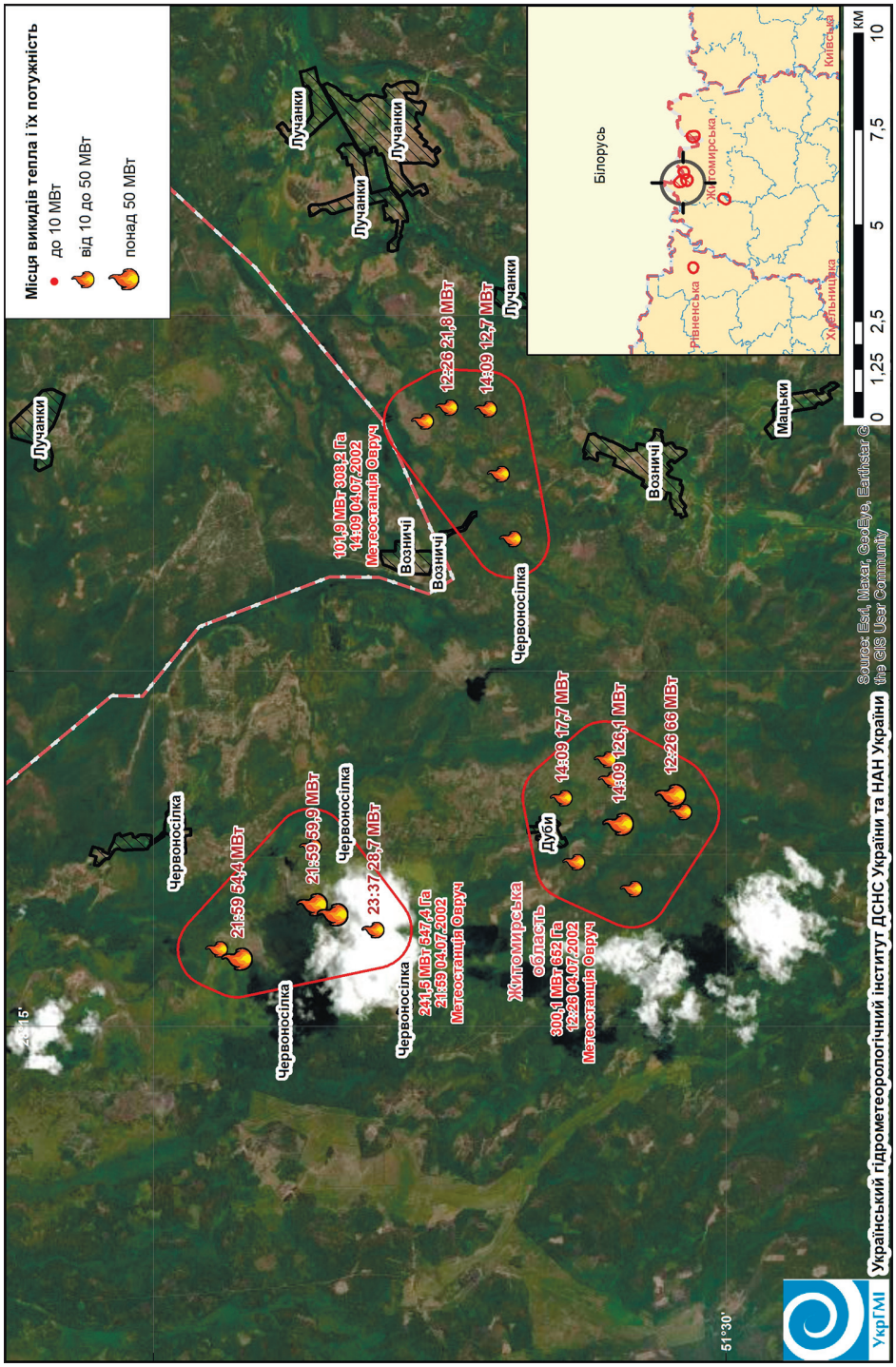


Рис. 1.16. Одна з перших пожеж, виявлених за супутниковими даними, 4 липня 2002 року, Житомирська область

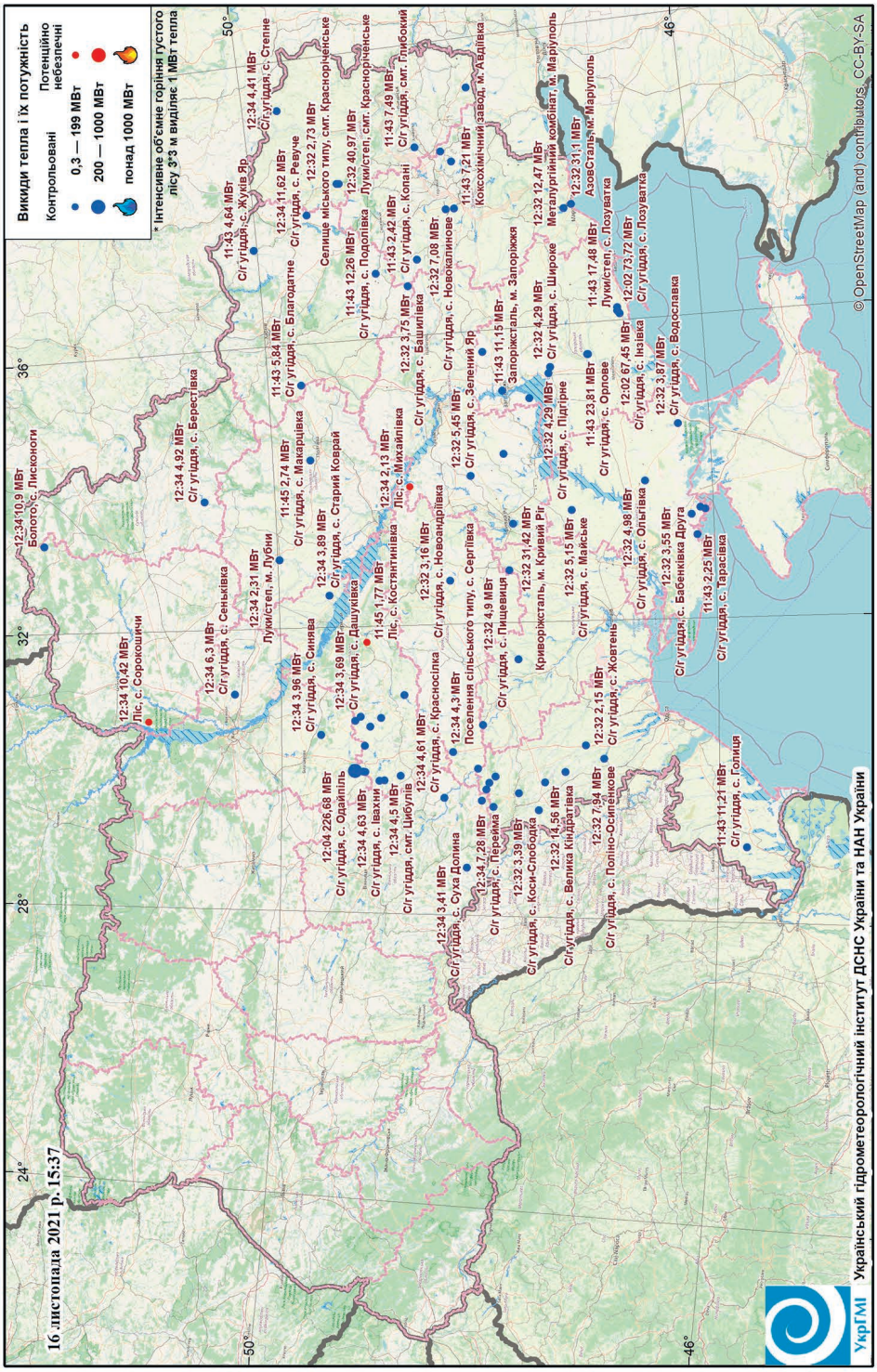


Рис. 1.17. Карта викидів тепла з відображенням об'єктів із сумарними характеристиками викидів

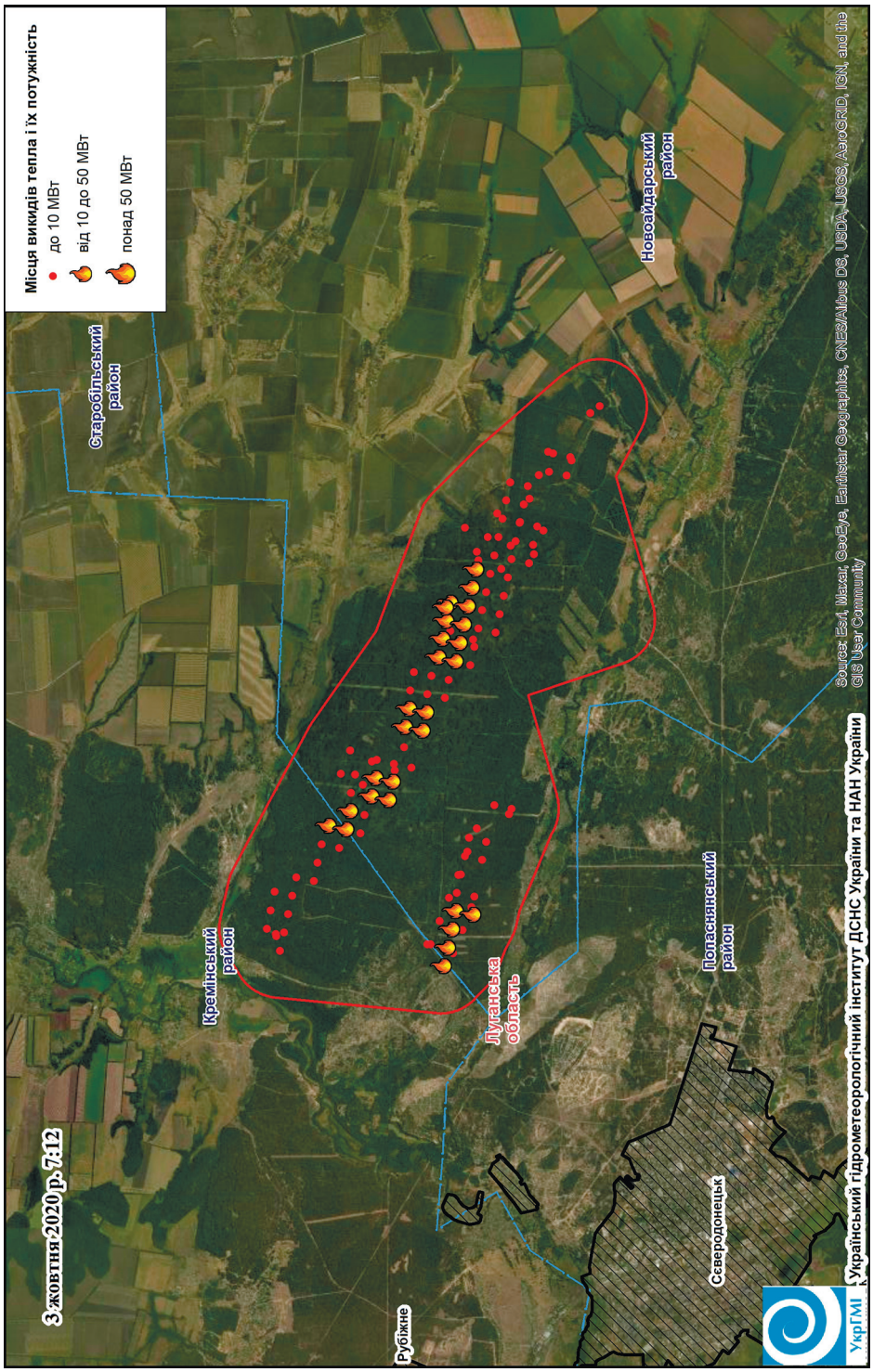


Рис. 1.18. Лісова пожежа у Луганській області, 2020 рік. Помітне регулярне розміщення викидів тепла

щоб за допомогою його передати інтенсивність сумарної потужності теплового випромінювання. Скажімо, пожежам потужністю від 0,3 до 199 МВт відповідатиме точка маленького діаметра (2 мм), пожежам потужністю від 200 до 1000 МВт — кружечок більшого діаметра (6 мм), а ще потужніші викиди позначають вогником (рис. 1.16). Додатково до масштабу пожежі потрібно передати ступінь її небезпеки, який визначається з характеристик рослинного покриву території, на якій її зафіксовано. Наприклад, для лісових масивів або великих ділянок степу можна обрати червоний колір. Синім кольором можна позначити контрольовані викиди тепла, які фіксуються в місцях із невеликими запасами горючих речовин або на об'єктах із протипожежними засобами.

Отже, для виявлення пожеж та їх класифікації використовували такі критерії.

1. *Потужність викидів тепла*, яка вимірюється у мегаватах (МВт) і визначає, наскільки інтенсивним є теплове випромінювання від ділянки місцевості, що потрапляє на термосенсор. Мінімальне значення, яке може бути зафіксоване, — 0,2 МВт (200 кВт), максимальне — понад 250 МВт. Загалом потужні викиди тепла, як правило, пов'язані з відкритим вогнем, який поширюється на великій площі. Для великих пожеж характерні значення понад 50 МВт.

2. *Групування викидів тепла*. Наступним критерієм пожежі є зосередженість викидів тепла на відносно невеликій території. Як правило, пожежа навіть у початковій стадії має досить великий ареал, кілька її осередків (рис. 1.16) потрапляють на ряд пікселів сенсора супутника й ідентифікуються як група викидів тепла. Зафіксовані 3—4 точки дозволяють окантурити «підозрілу на пожежу» ділянку і підрахувати сумарні параметри групи викидів тепла для ідентифікації. Ареал пожежі фіксується як група термоточок різної потужності, які можуть зайняти невелику частину площі віртуального пікселя термосканера, і останній зафіксує його як викид тепла невеликої потужності. Горіння лісової підстилки також фіксується як група малоінтенсивних термоточок. Так само можуть ідентифікуватися пожежі за наявності хмарного покриву. Сусідні викиди тепла, скановані одним супутником, розміщуються рядами у вигляді регулярної матриці (рис. 1.18). Однак тривала пожежа фіксується кількома супутниками, тому викиди тепла розташовуються без чіткого порядку.

3. *Сумарна потужність пожежі*. Велика пожежа, як правило, має кілька осередків, між якими є певна відстань, зазвичай невелика — близько 50—100 м, однак за умови сильного вітру виникають осередки на значно більшій відстані — до 1 км. Відповідно, ґрунтуючись на емпіричних даних та результатах практичних досліджень, було вирішено викиди тепла з одного супутника об'єднувати в один осередок, якщо відстань між термоточками становить менше як 2 км. Це значення додатково підтверджується таки-

ми міркуваннями. Відстань між сусідніми пікселями у спектрорадіометра MODIS найбільша (1,1 км). Якщо відстань між вогнищами до 500 м, вони гарантовано потраплять на сусідні пікселі термосканера і відстань між термоточками цієї пожежі становитиме 1,1 км. Якщо ж відстань між цими осередками перевищує 1200 м, їх точно слід ідентифікувати як різні осередки. Тоді спектрорадіометр може показати їх через один піксель, тобто на відстані 2,2 км. Відповідно, значення у масштабі місцевості менше 2,0 км між різними викидами тепла дозволяє однозначно оконтурити цілісний осередок пожежі. Об'єднання викидів тепла у контур пожежі можливе за наявності мінімум трьох точок. Далі для кожного з них розраховують сумарну потужність усіх викидів тепла, які потрапляють у межі цього полігона. Віддалені викиди тепла при цьому не враховують. Найбільш типове значення сумарної потужності викидів тепла при пожежі становить сотні мегаватів. На початковій стадії пожежа може характеризуватися потужністю понад 10 МВт, а сумарна потужність викидів тепла понад 1 ГВт (1000 МВт) однозначно свідчить про масштабну пожежу.

4. *Матеріал горіння.* Річ у тім, що потужні пожежі, які фіксуються за супутниковими даними, найчастіше є штучними і контрольованими. Переважно вони пов'язані зі спалюванням відходів сільськогосподарського виробництва після збирання врожаю (рис. 1.19). Такі пожежі відбуваються регулярно і їх вважають умовно безпечними, так само як і викиди тепла в межах промислових зон. Однак лісові пожежі (матеріал горіння — деревина) є найбільш небезпечними і неконтрольованими. Небезпечними є також пожежі на луках, особливо в заповідниках (матеріал горіння — сіно/трава).

Класифікацію матеріалів горіння було проведено за покривом земної поверхні. Це не найбільш досконалий спосіб класифікації, однак його можна реалізувати в програмному забезпеченні. Для цього було обрано дев'ять матеріалів горіння (сіно/торф, сіно/трава, деревина, дерев'яні будівлі, промислові горючі матеріали, сміття/сіно, об'єкт на воді, стерня, чагарники) і пов'язано їх з найпоширенішими дев'ятьма видами земного покриву (болото, луки або степ, ліс, населений пункт, промзона, пустир, річка або водойма, сільськогосподарські угіддя, чагарники).

На особливу увагу заслуговує горіння чагарників, оскільки ці території, як правило, не задіяні в господарстві, а отже, не охороняються власниками. Може трапитися й такий випадок. Наприклад, зафіксовано потужне горіння поля, яке ще не досягло лісового масиву, але ця пожежа є контрольованою і небезпеки не становить. Проте супутники можуть показати ці викиди тепла як горіння в лісі, адже роздільна здатність сенсорного масиву приведе до зміщення координат осередків на 170—400 м. У цьому разі для фільтрації таких точок слід застосовувати умову «викид тепла >10 МВт», оскільки такі «сторонні» викиди найчастіше є малопотужними. Якщо ж пожежа дійсно поширюється на лісовий масив (рис. 1.20), сумарна потуж-

Рис. 1.19. **Викиди тепла на сільськогосподарському угідді при спалюванні відходів**

ність викидів тепла швидко зростатиме і становитиме понад 40 МВт, що переведе цей ареал у розряд небезпечних.

5. *Площа ареалу пожежі.* Пожежа вважається потенційно небезпечною, якщо охоплює понад 3 тис. га лісової рослинності або 10 тис. га інших видів матеріалів горіння. Ареал пожежі не тотожний вигорілій місцевості або місцевості, яка безпосередньо перебуває під вогнем. Решту теплових аномалій, яка не потрапила до контуру, вважатимемо «невеликими вогнищами різного походження».

Однак для дослідження пожеж за даними супутникових спостережень важливим є не стільки виявлення всіх пожеж, скільки виокремлення з них потенційно небезпечних. Для цього пожежа має відповідати одночасно всім п'ти визначеним вище критеріям. Проте високе значення якогось одного критерію також є підставою для віднесення пожежі

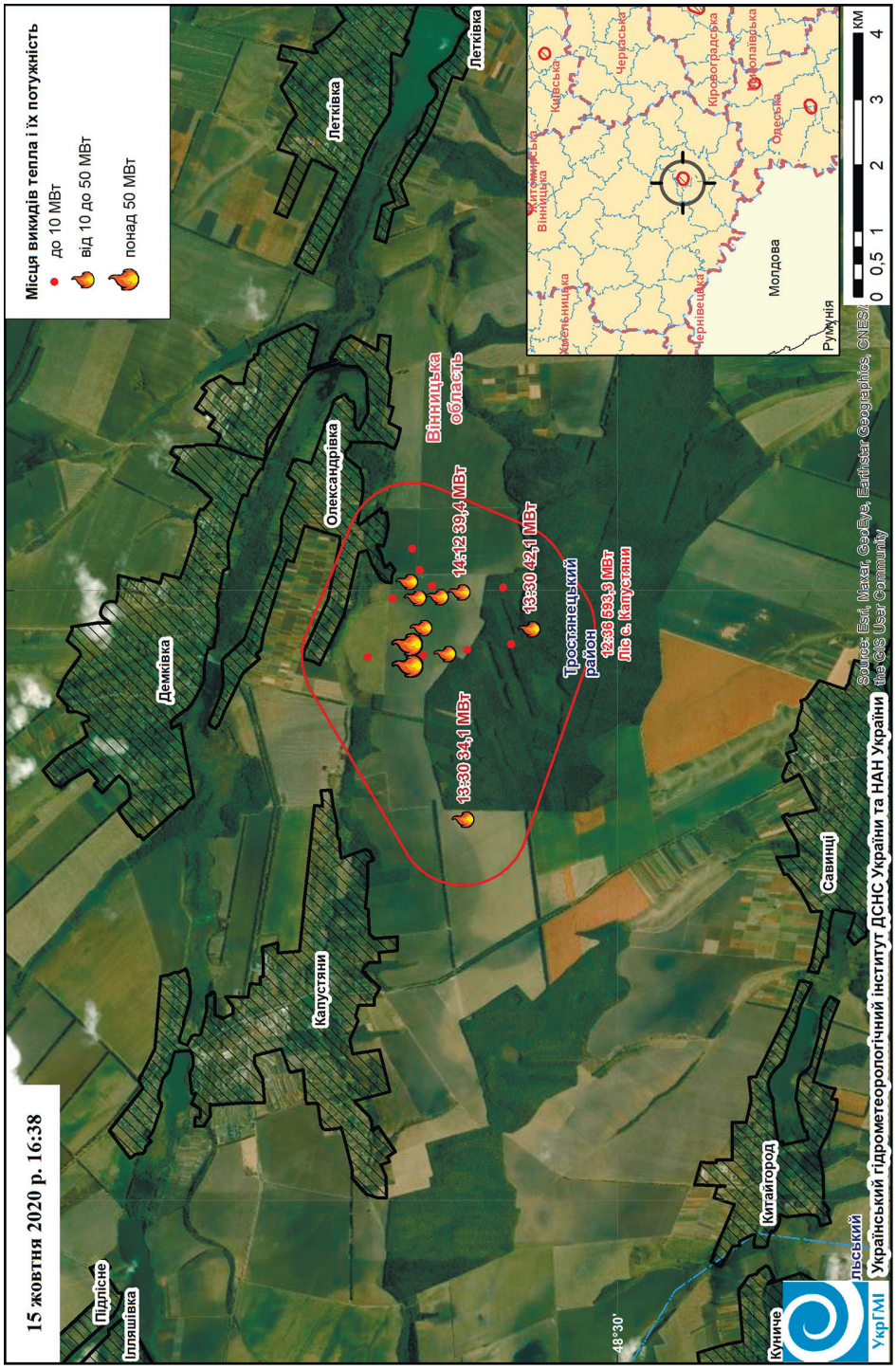


Рис. 1.20. Приклад потенційно небезпечної пожежі

до розряду небезпечних. Лісові пожежі виділяють в окремий клас і обробляють за окремим алгоритмом.

Отже, великими і потенційно небезпечними пожежами, незалежно від матеріалу горіння, вважатимемо пожежі, для яких сумарна потужність викидів тепла — понад 300 МВт та/або площа пожежі — більш як 10 тис. га; потенційно небезпечними лісовими пожежами — займання, для яких хоча б частину викидів тепла з потужністю понад 40 МВт зафіксовано на території лісового масиву або є одиничний викид тепла потужністю понад 10 МВт на території лісу, або сумарна потужність горіння становить більш як 200 МВт, зокрема й поблизу лісу, або горіння відбувається на площі понад 3 тис. га. Усі знайдені великі зосередження викидів тепла, які відповідають наведеним вище критеріям, записуємо у два масиви (лісові та інші пожежі) і обробляємо окремо.

За результатами спостережень упродовж більш як двох років можна зробити такі висновки. Переважна більшість викидів тепла, які фіксуються за допомогою супутникових спостережень, спричинені сільгоспвиробництвом, пожежами в лісових масивах і луках, меншою мірою — промисловими підприємствами або «рекреаційною» діяльністю людини. Останнім часом до них додалися займання від ведення бойових дій. На «вільних від людини» територіях пожежі трапляються значно рідше, але бувають масштабними і зумовлені незаконною діяльністю, наприклад мисливством у заповідниках.

Також немає чіткої візуальної кореляції між кількістю викидів тепла і рослинним покривом. Викиди тепла фіксуються на залісених і частково залісених ділянках так само, як і на полях. Це означає, що до факторів, які зумовлюють виникнення і поширення пожеж, насамперед належать антропогенні, а не природні.

Час появи теплових аномалій і пожеж має чітко виражений сезонний характер і залежить від рівня пожежної небезпеки, який визначається температурою і кількістю опадів, графіка проведення сезонних робіт (спалювання відходів навесні, наприкінці літа й восени), а також від активізації діяльності людини (відпочинок на природі в теплі дні, незаконні вирубки лісу тощо). Викиди тепла від промислових підприємств у холодний період року мають меншу інтенсивність через зниження температури нагрітих поверхонь.

Отже, критеріями пожеж, потрібними для їх виокремлення і класифікації (за результатами супутникових спостережень), є компактне розташування викидів тепла, їх потужність, у тому числі й сумарна в межах контуру пожежі, площа цього контуру і тип матеріалу горіння.

1.7. Просторовий і часовий розподіл великих пожеж по території України і фактори, які впливають на нього

З огляду на викладений вище матеріал і з урахуванням характеристик рослинного покриву території, опрацюванням теплових аномалій за даними супутникового сканування можна визначити найбільші пожежі і скласти їх геопросторову базу даних. Картографічний метод дослідження дозволяє вивчити особливості локалізації пожеж на території України, а відтак, визначити найбільш уражені ними ділянки. Такий аналіз дає змогу встановити також закономірності їх просторового та часового розподілу по території і, можливо, виокремити потенційно найбільш пожежонебезпечні ділянки.

Попередні розвідки, пов'язані зі створенням такої бази даних засвідчили переважання пожеж на сільськогосподарських угіддях. З одного боку, згорання великих обсягів врожаю є важливим для аналізу пожеж і формування цілісної картини, але пожежі на сільськогосподарських угіддях не можна відрізнити від контрольованих спалювань залишків сировини (соломи), які майже всі є контрольованими. Відповідно, база даних міститиме переважно господарські технологічні займання, які «забиватимуть» неконтрольовані і небезпечні пожежі. Було відкинуто також і пожежі на ґрунтах із низькорослою рослинністю, оскільки через малі запаси горючих матеріалів вони не становлять значної загрози для навколишнього середовища. Тому було вирішено не враховувати такі займання, а розглядати лише великі пожежі на територіях, покритих лісом. Крім того, лісові пожежі є найбільш небезпечними, що пов'язано з такими факторами:

- наявність великих запасів горючої сировини (деревини) на одиницю території;
- складність доступу до осередку пожежі, самі дерева є перешкодою для пересування наземної техніки;
- висока інтенсивність горіння деревини.

Методика пошуку пожеж була такою. Спочатку було завантажено і об'єднано в один масив усі викиди тепла, зафіксовані за період супутникових спостережень у 2001—2020 роки. З цих викидів тепла вибрано ті, які потрапляли на залісену територію. Всі вибрані викиди тепла було відсортовано по даті. Скрипт послідовно вибирав всі викиди тепла на одну дату, об'єднував точки, які розміщені поряд (на відстані, менше 2,0 км), в ареали, обраховував характеристику кожного ареалу: його площу, сумарну потужність пожежі, а також вказував час її виникнення. Для кожної такої пожежі було створено космофотокарту (наприклад, космофотокарти, наведені на рис. 1.16, рис. 1.18, рис. 1.20). Всього було виявлено 3271 пожеж, з них у 2020 році — 1320. Насправді така їх кількість надмірна, що пояснюється

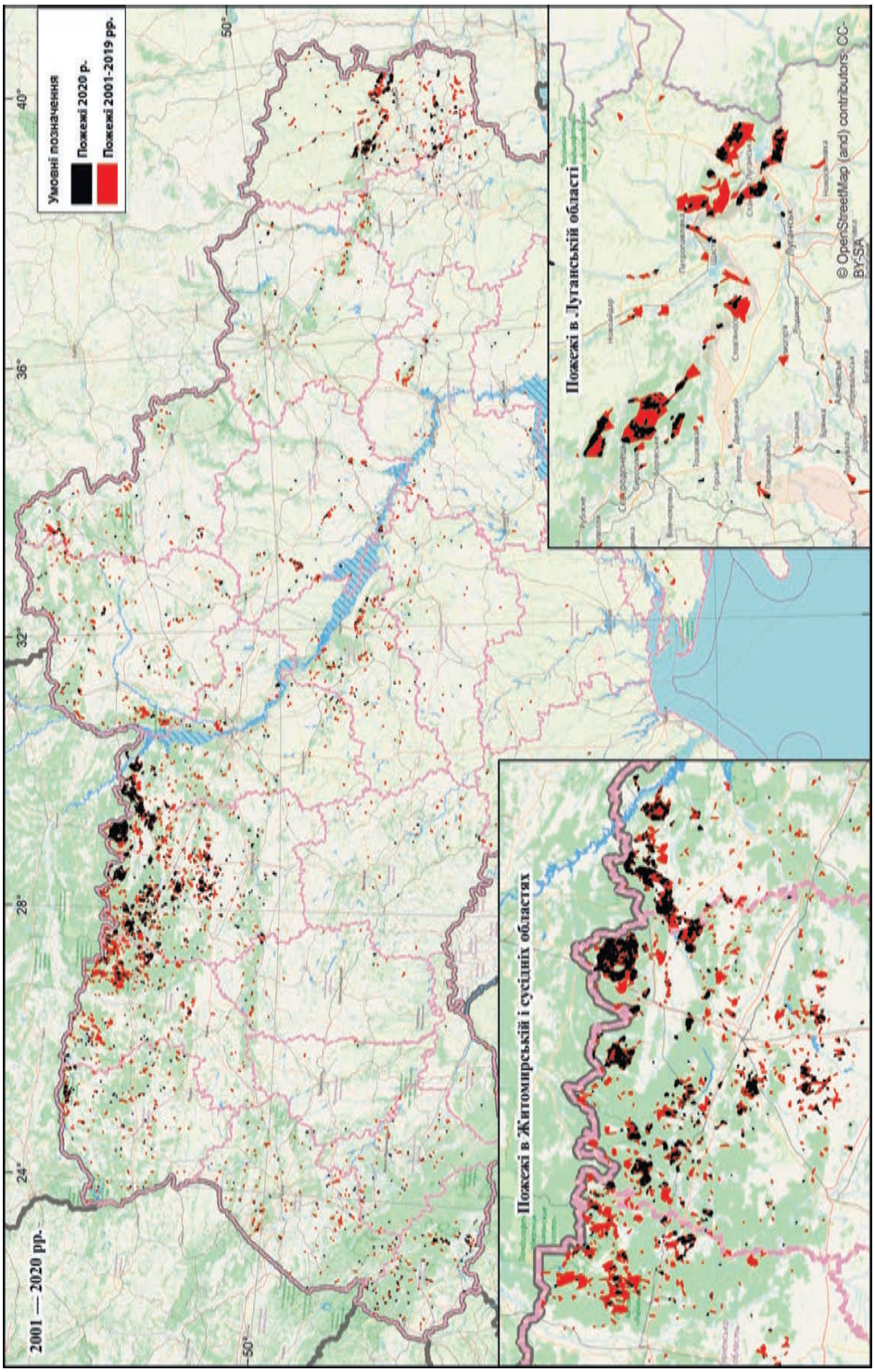


Рис. 1.21. Лісові пожежі, зафіксовані в період супутникових спостережень 2001—2020 років

числом осередків пожеж, які могли ідентифікуватися як нові пожежі впродовж кількох днів. Однак ця бібліотека зображень виявилася корисною для аналізу лісових пожеж за весь період супутникових спостережень.

Для зручності представлення в цій монографії всі контури пожеж було нанесено на одну картографічну основу (рис. 1.21). Для контурів пожеж буфер не проводився, їх площі показано в натуральну величину в масштабі карти. Такий підхід дозволяє оцінити масштаб пожеж — можна бачити, наскільки вони були вражаючими!

Для опису просторових і часових закономірностей розподілу лісових займань по території України використано такий самий підхід, як і до аналізу викидів тепла, викладений у попередніх підрозділах.

Найбільші лісові пожежі було зафіксовано в 2020 році (у квітні, липні та жовтні) у північній частині Житомирської, Київської, Рівненської областей, а також у центральній частині Луганської області. На карті (рис. 1.21) їх позначено чорним кольором. Причинами цих пожеж стали аномально низька кількість опадів та сильні вітри, що зумовило високий ступінь пожежної небезпеки, а також людський фактор — спалювання деревини, відходів сільгоспвиробництва, активність відпочивальників. Площа осередків цих пожеж становила від 10 до 50 тис. га. Проте на карті можна помітити, що пожежі на цих ділянках траплялися і раніше, охоплюючи сумарно більші площі. Особливо «багатим» на пожежі був 2015 рік, впродовж якого (кінець березня, квітень, кінець серпня, вересень) займання відбувалися в Київській, Рівненській, Житомирській та Сумській областях [26]. Ці пожежі також були значні за площею — від 2 до 8 тис. га.

Загалом у 2020 році зафіксовано 874 великі осередки лісових пожеж, У 2019 році — 292, у 2018 році — 98, у 2017 році — 135, у 2016 році — 161, у 2015 році — 821, у 2014 році — 421, у 2013 році — 50, у 2012 році — 133 осередки. При цьому за весь період з 2001 по 2011 рік зафіксовано 295 пожеж. Однак порівняння цих даних не є коректним, оскільки з 2011 року суттєво зросла точність виявлення пожеж супутниковими методами після виведення на орбіту спектрорадіометра VIIRS, який як мінімум учетверо більш чутливий, ніж MODIS. Тому можна лише стверджувати, що в 2020, 2015, 2014 і 2002 роках спостерігалося багато масштабних лісових пожеж, але порівнювати їх між собою не можна.

Крім Київської, Рівненської, Житомирської та Сумської областей великі лісові пожежі траплялися також у Волинській, Львівській, Івано-Франківській, Луганській та Черкаській областях. Найбільшу кількість пожеж на Західній Україні зафіксовано у 2020, 2019, 2015, 2014 і 2012 роках Приблизно такі самі тенденції характерні й для Центральної та Східної України (особливо в 2014 році).

Ці дані свідчать про залежність потужності пожеж від погодних умов, а саме, від середньодобової температури повітря, кількості опадів, швидко-

сті вітру. Крім того, кількість пожеж напряму залежить від антропогенної діяльності — сільськогосподарські роботи, сезон полювання, відпочинок населення на природі за хорошої погоди найчастіше є першопричинами виникнення пожеж.

Швидкість локалізації та ефективність ліквідації пожеж визначається спроможністю пожежогасіння на ділянках займання, наявністю відповідної інфраструктури, можливістю фізично дістатися місць виникнення пожеж.

1.8. Порівняння пожежної ситуації в Україні і в європейських країнах

Перевагою супутникових зйомок є об'єктивні результати, які не спотворені суб'єктивними підходами до збору статистики, визначення і класифікації пожеж. З карт, наведених на рис. 1.22 і 1.23, добре видно чітку відмінність у кількості зафіксованих викидів тепла між країнами Східної та Південно-Східної Європи і центрально- та західноєвропейськими країнами — достатньо порівняти кількість і розташування теплових аномалій на території таких країн як Україна, Росія, Білорусь, Молдова, Румунія, з територіями Німеччини, Франції, Польщі. Дуже показовим є приклад Калінінградської області РФ. Цей регіон явно вирізняється за кількістю викидів тепла з-поміж сусідніх територій Польщі, Латвії і Литви. Можна також помітити, що межа територій з великою кількістю викидів тепла практично збігається з державними кордонами країн Східної Європи. Безумовно, така ситуація пов'язана з різними підходами до ведення сільського господарства, організації антропогенної діяльності, а також з ефективністю екологічного нагляду.

Звісно, певною мірою на кількість пожеж впливає клімат — можна помітити збільшену кількість викидів тепла на півдні Італії, в Іспанії, Греції, Македонії. Значну роль у цьому відіграє підвищена пожежна небезпека в зазначених регіонах, зумовлена високими температурами повітря, сильними вітрами та низькою кількістю або взагалі відсутністю опадів.

Для більш детального порівняльного аналізу особливостей просторового розміщення викидів тепла в Україні та в країнах Європи, було вибрано три європейські держави: Румунію, Польщу і Німеччину. Румунія найбільш подібна до України за рівнем соціально-економічного розвитку, Німеччина є серед них найбільш економічно розвиненою країною, а Польща посідає в певному сенсі «проміжне» місце, тобто має відносно високий рівень розвитку сільського господарства і промисловості, але водночас близька до України за способом життя населення, його рівнем культури і менталітетом.

Викиди тепла на території Румунії мають такі самі закономірності розміщення, як і в Україні: на незадіяних у господарській діяльності територіях фактично немає викидів тепла. Це насамперед Румунські Карпати

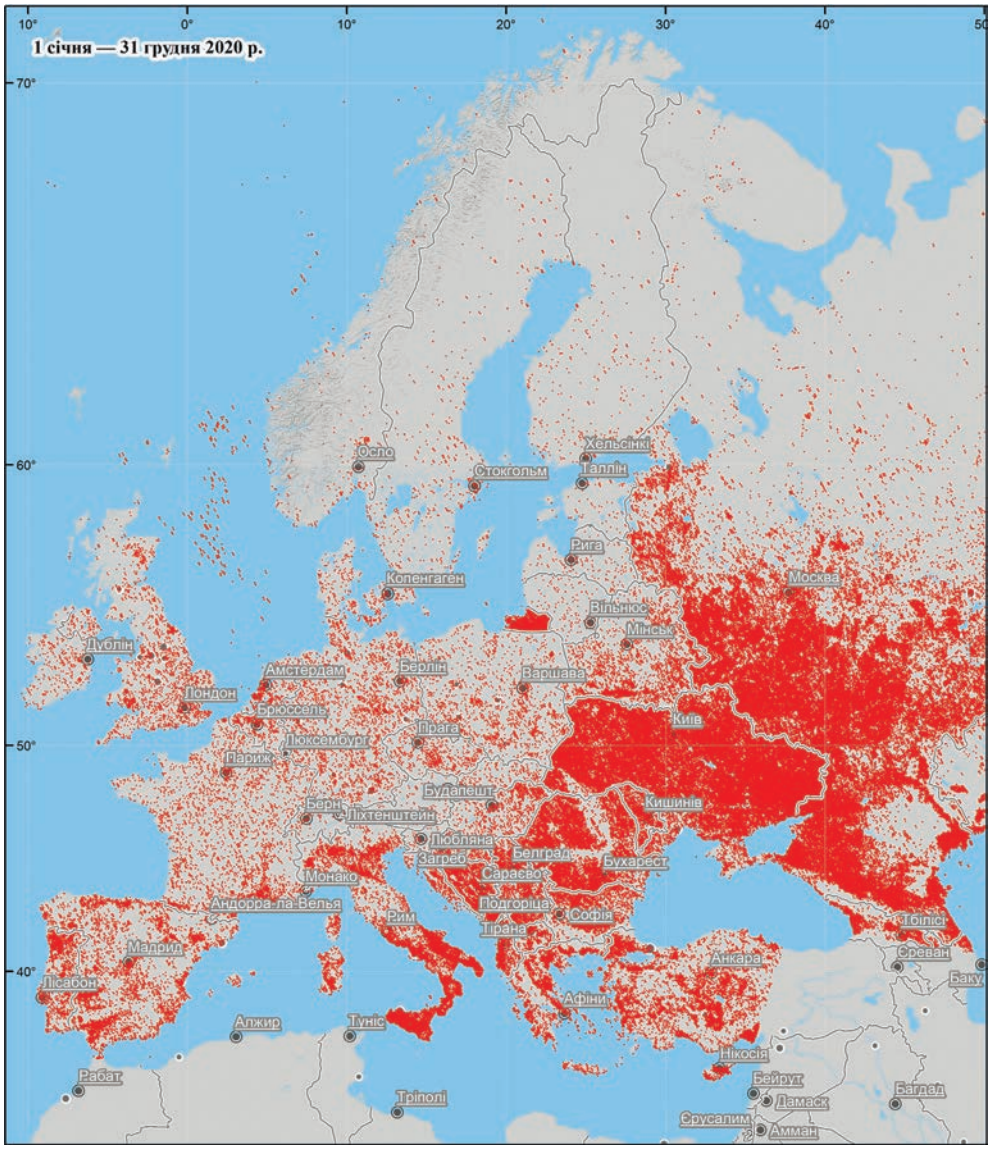


Рис. 1.22. Викиди тепла на території європейських країн у 2020 році (всього зафіксовано 1 122 488 викидів тепла)

(рис. 1.24). Водночас викиди тепла концентруються в дельті Дунаю та однойменному заповіднику. Отже, відсутність на певних територіях розвиненої інфраструктури у поєднанні з людським фактором призводять до того, що в разі виникнення займання часто набувають масштабного характеру, тобто тривають довго і охоплюють значні площі. Причини займань на заповідних територіях у Румунії, ймовірно, ті самі, що й в Україні. Сільськогоспо-

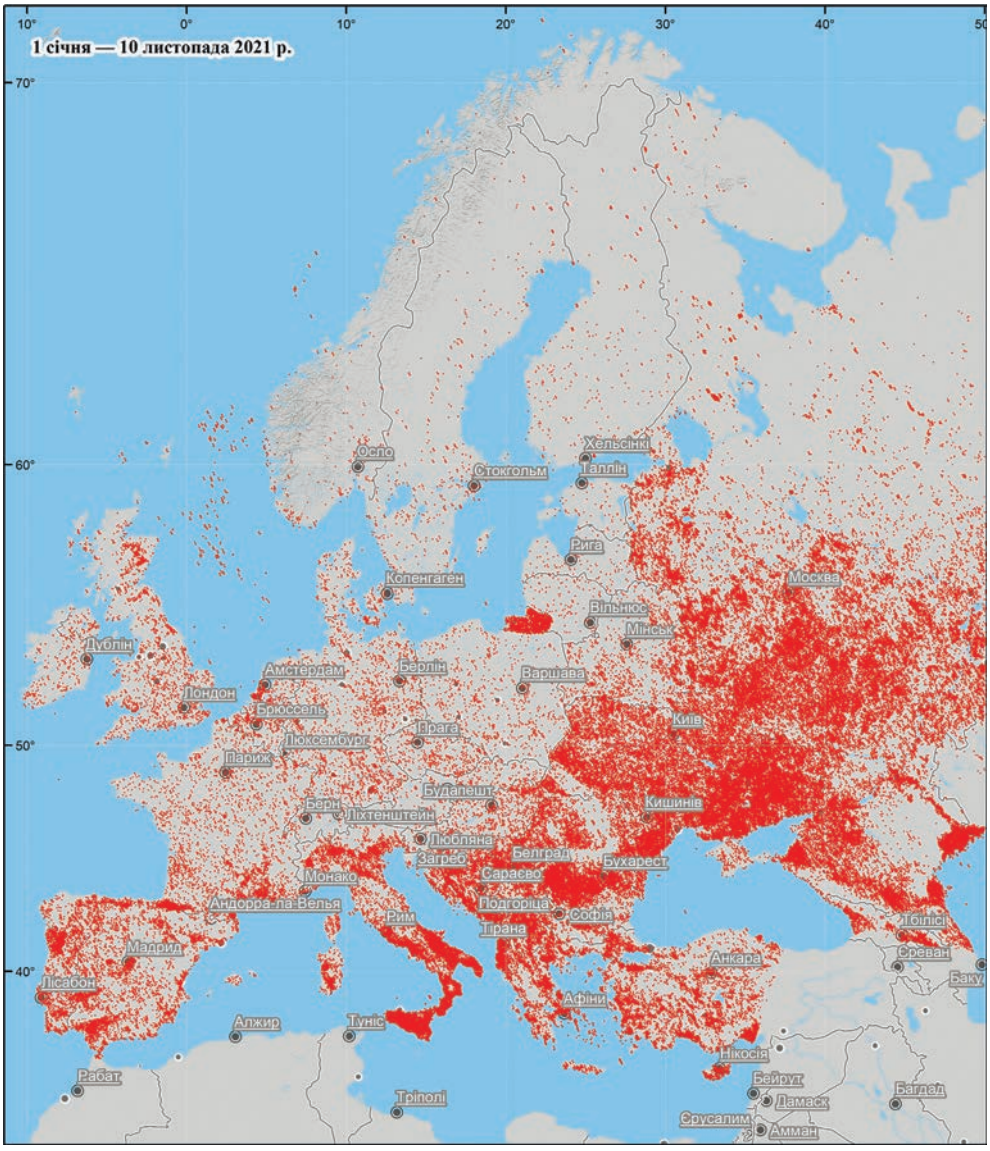


Рис. 1.23. Викиди тепла на території європейських країн у 2021 році (всього зафіксовано 878 742 викиди тепла)

дарські угіддя, розміщені в південній, східній та північно-західній частині Румунії, роблять головний «внесок» у кількість викидів тепла. Теплові аномалії відносно рівномірно розподілені на цих територіях, що свідчить про їх штучне походження і контрольованість (немає груп з чіткими ареалами, які зазвичай вказують на стихійність і масштабність пожежі). Припустити «масові» пожежі, що рівномірно випалили всю територію Румунії, звісно,

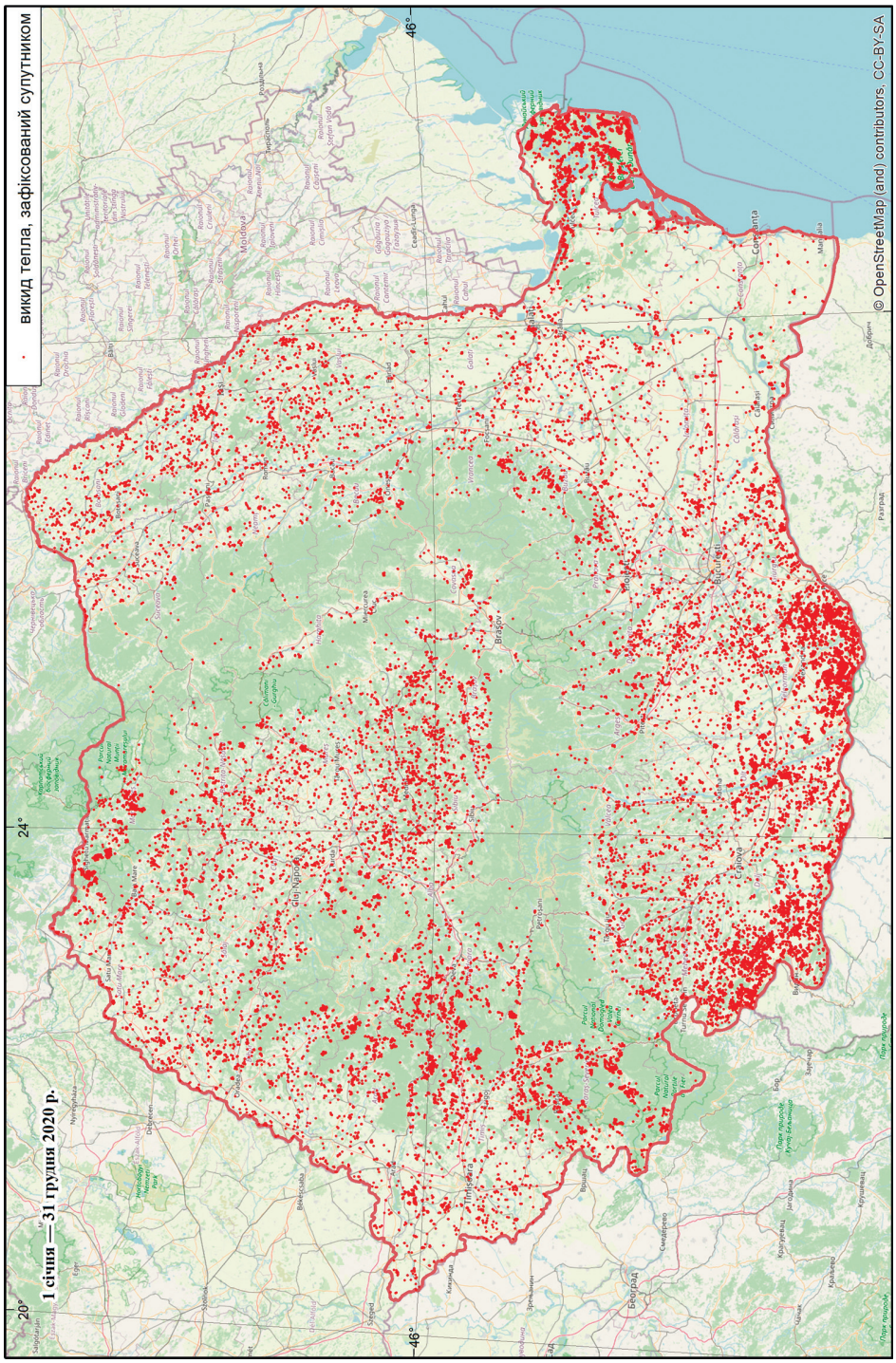


Рис. 1.24. Просторовий розподіл викидів тепла по території Румунії у 2020 році (всього зафіксовано 36 517 викидів тепла)

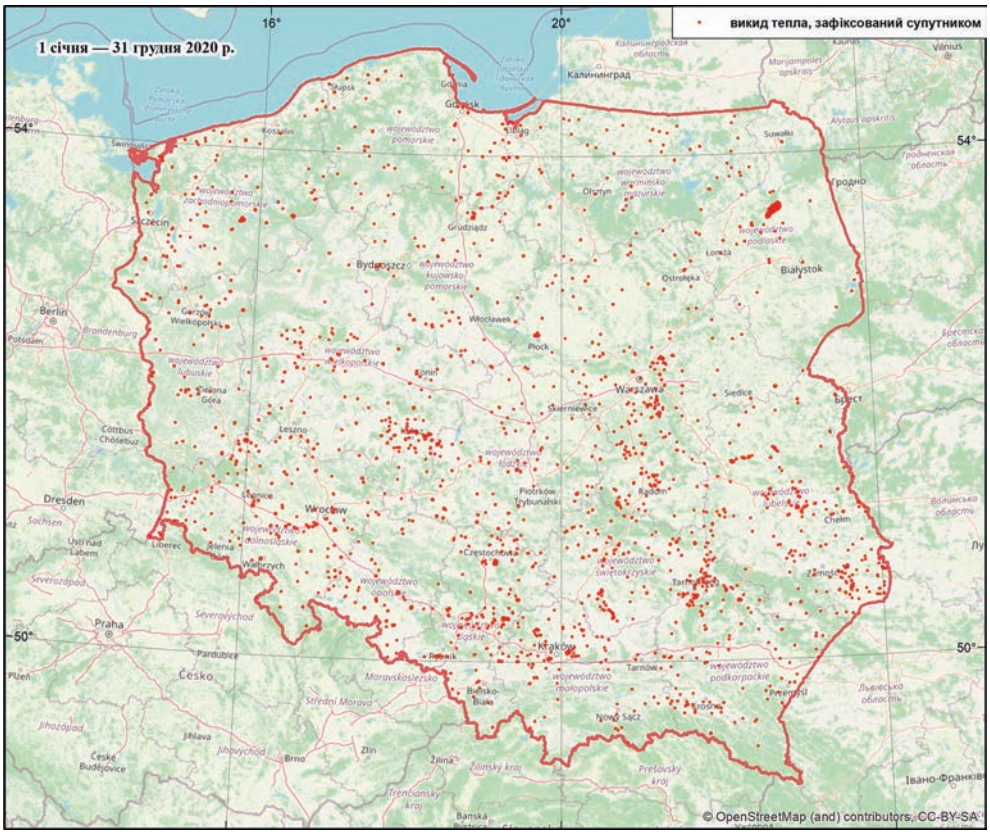


Рис. 1.25. Просторовий розподіл викидів тепла по території Польщі у 2020 році (всього зафіксовано 11 537 викидів тепла)

неможливо. Крім того, на кількість викидів тепла впливає активність рекреаційної діяльності населення — багато теплових аномалій фіксуються в парках і зелених зонах відпочинку.

У Польщі кількість викидів тепла є значно меншою порівняно з Румунією і Україною (рис. 1.25). На її території є лише одна ділянка, яка має велику кількість теплових аномалій — це заболочена місцевість уздовж р. Бєбжа на території однойменного національного парку, вище за течією від м. Гоньондз. У 2020 році всі викиди тепла відбувалися там у період з 20 по 23 квітня. В публікаціях [27, 28] як причину пожежі вказано незаконне випалювання трави. Також порівняно багато викидів тепла зафіксовано на територіях польського нафтопереробного концерну «Orlen» та інших великих промислових, зокрема нафтопереробних, підприємств. Теплових аномалій на сільськогосподарських угіддях практично немає, що свідчить про використання альтернативних спалюванню способів утилізації відходів агровиробництва і жорсткий контроль за їх дотриманням.

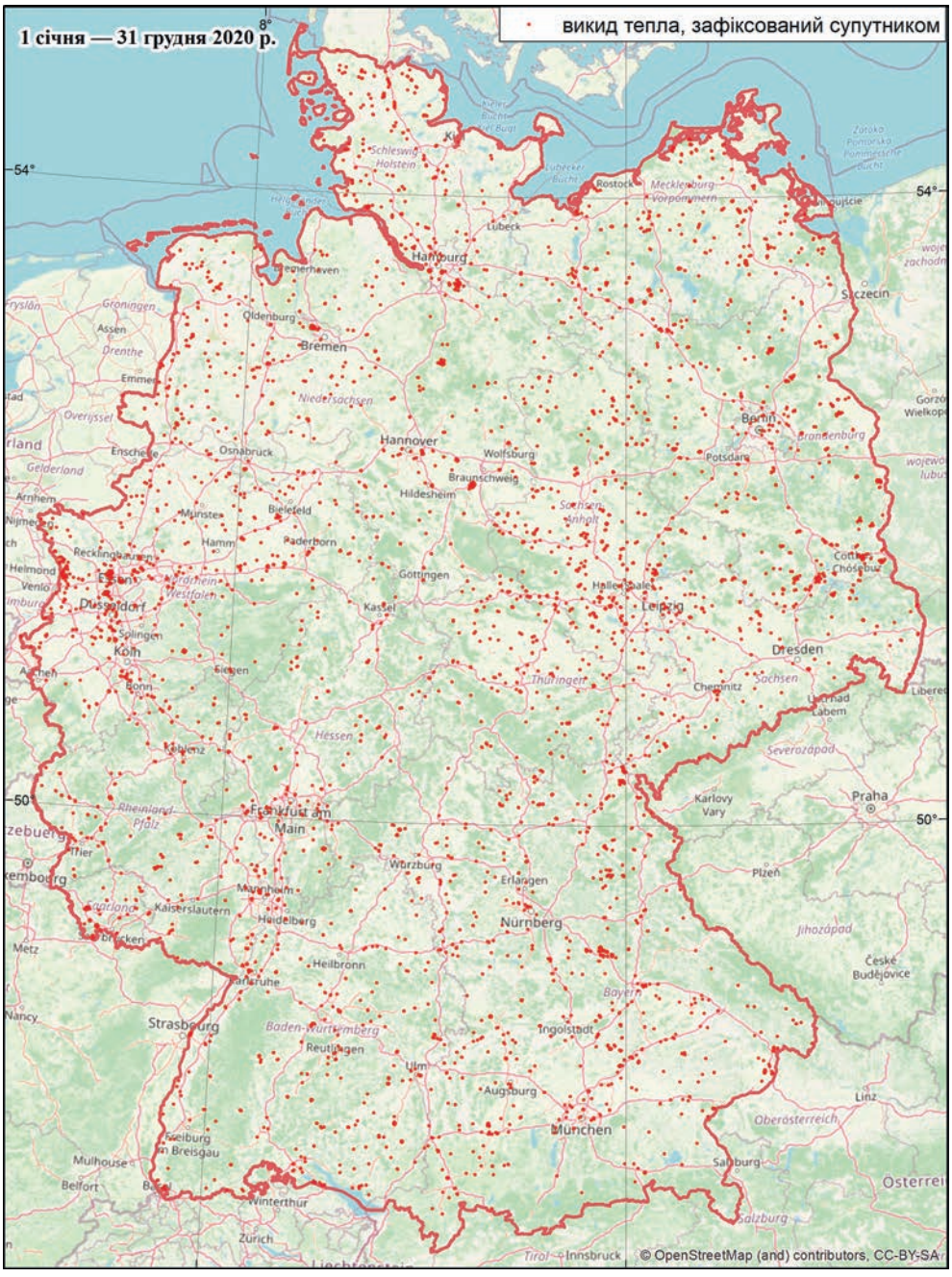


Рис. 1.26. Просторовий розподіл викидів тепла по території Німеччини у 2020 році (всього зафіксовано 39 349 викидів тепла)

У Німеччині (рис. 1.26) у 2020 році великих пожеж узагалі не було зафіксовано. Теплових аномалій на сільськогосподарських угіддях також немає, а специфіка німецької промисловості не передбачає наявності низькотехнологічного виробництва з високими рівнями викидів теплової енергії.

Отже, з матеріалу, викладеного в цьому розділі, можна зробити такі загальні висновки.

1. Супутниковий моніторинг пожеж передбачає проведення зйомки в інфрачервоному спектрі за допомогою сканерів, встановлених на штучних супутниках Землі, кожний з яких двічі на добу покриває практично всю територію земної кулі. З цих знімків отримують інформацію про викиди тепла, температура яких на 20 і більше градусів перевищує номінальну для кожної конкретної місцевості.

2. Супутниковий моніторинг дозволяє досить точно виявляти окремі викиди тепла на відкритій місцевості (потужністю понад 0,2 МВт) і пожежі (потужністю більш як 0,6 МВт).

3. Для супутникового моніторингу пожеж є обмеження, пов'язані з технологією спостережень: хмарний покрив або щільний туман перешкоджають фіксації теплових аномалій. Щоправда, потужні пожежі фіксуються навіть за щільної хмарності, однак зі значно зменшеними показниками. Не фіксуються також викиди тепла, які виникли в період між прольотами супутників та швидко згасли.

4. Не всі викиди тепла вказують на пожежу, більша частина теплових аномалій спричинена антропогенною діяльністю: спалюванням стерні на полях, розігрітими печами цементних та металургійних заводів тощо.

5. Викиди тепла на території України не мають чіткого географічного розподілу. Вони досить рівномірно покривають всю територію країни, за винятком гірських територій та Чорнобильської зони відчуження. Розподіл викидів тепла в часі інший: найбільше теплових аномалій спостерігається в березні-квітні та у липні-серпні; найменше — в зимовий період, а також у травні.

Розділ 2

СИСТЕМА МОНІТОРИНГУ ВИКИДІВ ТЕПЛА ТА ВИЯВЛЕННЯ ПОТЕНЦІЙНО НЕБЕЗПЕЧНИХ ПОЖЕЖ

Інформаційно-аналітична система автоматизованого моніторингу викидів тепла на території України за супутниковими даними, яку було розроблено і створено в Українському гідрометеорологічному інституті ДСНС України та НАН України, призначена не лише для виявлення потенційно небезпечних пожеж, а й для їх класифікації з виокремленням займань на території лісових масивів, які можуть становити особливу загрозу. В разі фіксації таких небезпечних ділянок в системі створюються космофотокарти збільшеного масштабу з метою їх подальшого аналізу. У цьому розділі розглянуто концепцію розроблення програмного забезпечення, технологічні особливості системи моніторингу, проведено оцінку точності її роботи та окреслено шляхи підвищення точності пошуку потенційно небезпечних пожеж.

2.1. Розроблення концепції Системи моніторингу

На сьогодні приватними компаніями і державними установами різних країн створено певну кількість програмно-апаратних комплексів, призначених для отримання даних супутникових спостережень і відображення теплових аномалій у табличній або картографічній формі. Найбільш досконалі з цих комплексів і, ймовірно, найзручніші для користувачів відображають отримані дані за допомогою геопорталів. Це насамперед ресурс FIRMS (Fire Information for Resource Management System) [20], створений NASA. Подібними до нього є ресурси NASA Worldview [29] і Interactive World Forest Map [30], а також вітчизняний геопортал [31], розроблений Державним космічним агентством України.

Ці ресурси мають подібний функціонал: можуть виводити викиди тепла за вказаний користувачем часовий інтервал, використовуючи як підкладку кілька картографічних основ (рис. 2.1). Викиди тепла позначаються точками невеликого

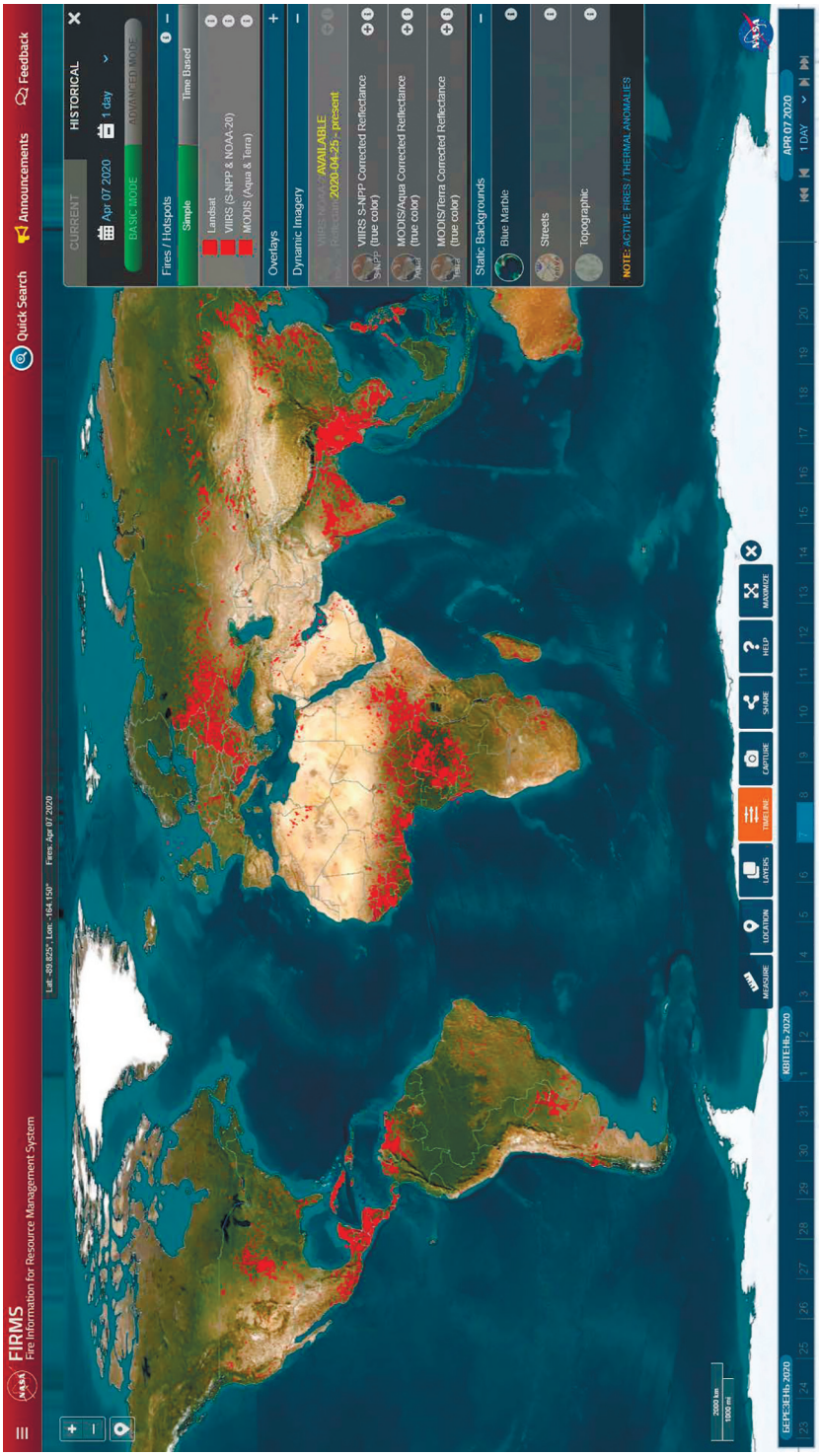


Рис. 2.1. Зображення екрана ресурсу FIRMS (Fire Information for Resource Management System) [20]

розміру, колір яких можна змінювати. Однак користування такими інформаційними продуктами ускладнено відсутністю наочної та узагальненої інформації про пожежі. Тому оцінка небезпеки пожежної ситуації передбачає перегляд кожної групи виявлених викидів тепла, що потребує масштабування зображення та інші маніпуляції. Такий підхід не є зручним і ефективним.

Все це було враховано під час розроблення концепції Системи моніторингу викидів тепла та виявлення потенційно небезпечних пожеж, описаної в цій монографії. Після вивчення попередніх напрацювань і аналізу досвіду зі створення таких програмно-апаратних комплексів було з'ясовано, що концепція досконалої системи моніторингу пожеж має відповідати певним вимогам.

Автоматизація роботи. Наявні системи моніторингу пожеж виводять зібрані супутниками дані лише у вигляді термоточок. Система моніторингу має виконувати опрацювання цих даних — визначати, на яких об'єктах виявлено термоточки, чи становлять ці викиди тепла небезпеку, подавати інформацію у зручному вигляді для додаткової оцінки ступеня небезпеки відповідальним фахівцем.

Одночасний доступ до результатів. У системі моніторингу має бути можливість одночасного перегляду даних кількома операторами. Такий режим роботи можна реалізувати за допомогою вебінтерфейсу, який до того ж повинен забезпечувати однотипність представленої інформації.

Зручність користувацького інтерфейсу і швидкість доступу до результатів. Система моніторингу пожеж має бути спроєктована так, щоб користувач міг отримати інформацію швидко і при цьому йому не потрібно було виконувати надмірну кількість маніпуляцій: ввімкнення комп'ютера, завантаження програми або геопорталу, пошук конкретної території, налаштування зображення, окремих процедур для того, щоб поділитися зображенням. Оптимальним є отримання оперативного повідомлення на смартфон і доступ до нього за допомогою одного-двох кліків.

Інформативність та оглядовість. Наявні геопортали відображають лише приблизне місце викидів тепла. Користувач не отримує відомості про величину потужності викидів тепла, матеріал горіння, час фіксації та інші важливі характеристики. Однак ця інформація має бути доступною відразу, в межах одного погляду на карту (екран), без потреби виконувати додаткові маніпуляції.

Імплементація. Більшість наявних систем моніторингу пожеж через накопичення в них недоліків унеможливлюють їх практичне використання або принаймні роблять його незручним. Ці розробки видаються недосконалими, реалізованими на низькому рівні, оскільки результати роботи програми мають бути яскравими, складними, інформативними. Система також не повинна відволікати увагу користувача звуковими повідомлен-

нями. Водночас у ній має бути передбачена можливість сигналізації про надходження нових даних, зокрема в разі виявлення критичних ситуацій із пожежами. При цьому варто уникати надлишкової кількості повідомлень: краще відкинути деякі ситуації, ніж пропустити займання, яке може перетворитися на велику пожежу.

Реалізація перелічених вище вимог сприятиме тому, що система моніторингу буде інформативною, а процес користування нею — нескладним.

Розроблення «дорожньої карти» реалізації системи моніторингу. Аналіз досвіду з реалізації різних інноваційних проєктів (стартапів) виявив головну їх проблему, пастку, в яку нерідко потрапляють розробники, — неспроможність довести проєкт до реально працездатного прототипу. Часто вже в процесі реалізації проєкту з'ясовується, що для втілення його в життя потрібно набагато більше часу та ресурсів, ніж було передбачено. Відповідно, від самого початку слід планувати якомога простіший проєкт з мінімально достатнім набором функцій, однак із закладеними в ньому можливостями радикальної зміни функціоналу і розширення переліку цих функцій в подальшому, що забезпечується модульністю, взаємною сумісністю і взаємозамінністю модулів, а також кросплатформністю, тобто можливістю роботи в різних операційних системах.

Можливість залучення додаткових спеціалістів передбачає вибір доступної і популярної серед фахівців інструментальної моделі (методів і засобів для розроблення продукту). Також це дозволяє надалі проводити модернізацію системи моніторингу іншими фахівцями і використовувати наявні напрацювання для вирішення інших завдань.

Отже, Система моніторингу пожеж являє собою комплекс програмних модулів, які можуть працювати незалежно один від одного. Модулі обмінюються даними через файли, які вони створюють. Повідомлення про успішність або помилки в роботі передаються через міжпрограмний інтерфейс. Модулі послідовно запускаються на виконання за наявності певної умови: оновлення даних про викиди тепла. Перший модуль має періодично перевіряти наявність оновлення даних, другий — завантажувати їх, наступні — конвертувати дані у зручний для оброблення формат, вводити поправки в отримані дані, виконувати геопросторові операції, наносити дані на карту, експортувати її, надсилати результати роботи на електронну пошту або в месенджер. Окремо здійснюється пошук потенційно небезпечних пожеж і виготовлення картографічних зображень у відповідній кількості. Створені за сесію карти надсилаються електронною поштою або через месенджер. Карти мають відображати генералізовані групи викидів тепла з підписом сумарної їх потужності, матеріалу горіння, часу фіксації і назви найближчого населеного пункту.

2.2. Характеристики Системи моніторингу і вимоги до апаратного забезпечення

Повна назва Системи моніторингу — Інформаційно-аналітична система моніторингу викидів тепла та виявлення потенційно-небезпечних пожеж. Вона призначена для виконання кількох завдань:

1) моніторинг зафіксованих на території України теплових аномалій;

2) ідентифікація займань у природних екосистемах, на сільськогосподарських угіддях і промислових об'єктах, визначення інтенсивності та площі зовнішнього контуру займань;

3) оперативне інформування користувачів.

Система моніторингу відстежує теплові аномалії потужністю понад 0,2 МВт (за ясної погоди). Для об'єктів, на яких виявлено ці аномалії, підраховується сумарна потужність займання та відображаються додаткові характеристики об'єкта:

- час фіксації супутниками викидів тепла;
- матеріал горіння;
- населений пункт, найближчий до центру пожежі (рис. 1.15).

Система моніторингу виявляє і позначає як потенційно небезпечні лісові займання з невеликою потужністю (рис. 1.16) та потужні пожежі, які охоплюють значну територію (рис. 1.18).

Усі пожежі за матеріалом горіння класифікують на лісові та інші (с/г угіддя, луки/степ, населені пункти, промислові об'єкти). Для кожного з цих класів окремо виконується пошук потенційно небезпечних пожеж.

Для великих займань застосовують такі критерії: сумарна потужність викидів тепла — понад 300 МВт або площа пожежі — більш як 10 тис. га.

Пошук потенційно небезпечних лісових пожеж значно складніший і здійснюється за такими критеріями: частину викидів тепла зафіксовано на території лісу і потужність горіння лісу перевищує 40 МВт; або є одиничний викид тепла на території лісу понад 10 МВт; або сумарна потужність горіння понад 200 МВт, в тому числі біля лісу, і площа горіння більша за 3 тис. га.

Всі знайдені зосередження викидів тепла, які відповідають наведеним вище критеріям, записують у 2 файли (для лісових та інших пожеж).

Втім, про пожежу, яка супроводжується масштабними викидами тепла, як правило, вже відомо пожежникам і населенню прилеглих до неї територій, тому факт її фіксації за супутниковими даними великої користі не становить. Важливішим є створення інформативного картографічного зображення для оцінки пожежної небезпеки фахівцями ДСНС України. Для фіксації пожежі на початковій стадії потрібно знайти спосіб відрізнити її від контрольованого спалювання залишків деревини.

Система моніторингу оперативно інформує підрозділи ДСНС України щодо потенційно небезпечних пожеж. Таке інформування здійснюється двома шляхами:

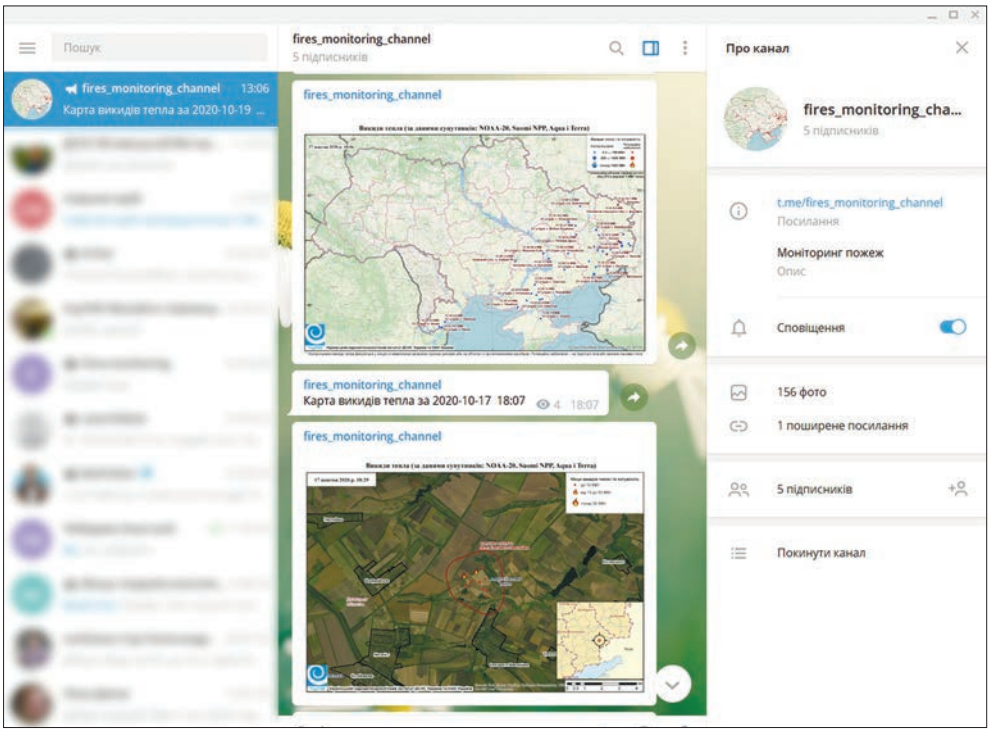


Рис. 2.2. Зображення екрана телеграм-каналу оперативних повідомлень

1) оперативні повідомлення надходять у телеграм-канал у вигляді карт викидів тепла. Їхня кількість і час надходження залежать від частоти оновлення даних, які у свою чергу визначаються наявністю викидів тепла і щільністю хмарного покриву. Повідомлення надходять від 6 до 15 раз на добу, вночі (з 0:00 до 8:00) і в другій половині дня (з 12:00 до 18:00). Якщо система моніторингу виявляє потенційно небезпечні пожежі (одну або кілька), вона додатково надсилає детальні космофотокарти відповідних ділянок (рис. 1.16, рис. 1.18);

2) звітні повідомлення про пожежну ситуацію на території України за першу і другу половини доби у вигляді карти викидів тепла система надсилає електронною поштою о 8:15 і 17:15.

На рис. 2.2 наведено зображення екрана телеграм-каналу оперативних повідомлень, який має назву fires_monitoring_channel. Доступ до цього каналу можна отримати або за допомогою месенджера Telegram для Android, iOS (iPhone) чи Windows, або за інтернет-посиланням https://t.me/fires_monitoring_channel. На сьогодні телеграм-канал є відкритим для підписки на нього всіх зацікавлених осіб, але згодом його видимість для непідписаних користувачів можна прибрати.

Розроблення модулів Системи моніторингу (крім картографічного блока) виконано за допомогою середовища і мови програмування Python, актуальної на той час версії інтерпретатора 3.9. Останній дозволяє вносити поправки в код програми фахівцями без необхідності зупинки роботи всієї Системи моніторингу або окремого модуля для їх перекомпіляції. Всі програмні модулі мають розширення *.py. Файли з розширенням *.bat використовуються для запуску модулів «у ручному режимі» під час їх відлагодження. Для автоматичної роботи Системи моніторингу вони не потрібні.

Картографічні модулі, за допомогою яких можна було б складати високоякісні карти, не можна було розробити на Python у прийнятні строки та з наявними ресурсами, незважаючи на широкий спектр розширень. Усі три картографічні модулі створено на мові ArcPy, інтеграцію їх у кінцеву програму виконано за допомогою модуля розширення Python — Subprocess.

Зважаючи на використане програмне забезпечення, можна зробити висновки про *системні вимоги до апаратного забезпечення,* з яким має працювати Система моніторингу.

Для отримання повідомлень від Системи моніторингу користувач повинен мати:

- адресу електронної пошти;
- встановлений месенджер Telegram.

Сервер Системи моніторингу має відповідати таким вимогам:

- операційна система Windows 10. Python 3.9 працює лише під Windows 10 і Linux. Модуль ArcPy, який можна встановити під Python 2.7, працює тільки під Windows і UNIX. Відповідно, єдиним варіантом залишається ОС Windows 10 Home Edition, Pro або Server;
- середовище програмування Python версії не нижче 3.4 зі встановленими (наявними) бібліотеками: os, datetime, smtplib, subprocess, telebot (слід встановлювати pytelegrambotapi, а не telegram, ця не працює), PIL (називається pillow), sys, imaplib, requests, urllib. Рекомендується встановлювати Python 3.9 або вищі версії;
- для модуля ArcPy потрібне середовище виконання Python 2.7, також Net Framework 3.5;
- доступ до Інтернету зі швидкістю не менш як 10 Мбіт/с, рекомендується 100 Мбіт/с;
- всі дані програми рекомендується розміщувати на диску F:\, а всі скрипти бажано помістити у папку F:\SCRIPTS\;
- наявність 4 Гбайтів дискового місця для копіювання файлів програми і карти геокодування;
- 60 Мбайтів дискового місця на день роботи Системи;
- потрібна також програма для перегляду зображень; за замовчуванням використовується FSViewer.

2.3. Структура і короткий опис модулів Системи моніторингу

Усі модулі, які входять до складу Системи моніторингу, можна поділити на п'ять груп: одна — керуючі модулі, ще чотири — функціональні: завантаження і обробка даних, пошук пожеж, створення карт, формування оперативних повідомлень і звітів (рис. 2.3).

Функціональні групи модулів виконують безпосередньо складові частини алгоритму опрацювання пожеж і візуалізації карт. Один і той самий функціональний модуль може запускатися різними керуючими модулями або виконуватися кілька разів поспіль (режим рекурсії).

Різні результати роботи Системи моніторингу досягаються використанням різних керуючих, або алгоритмічних модулів. Наприклад керуючий модуль Create&SendFires Report призначений для створення карти-звіту за половину доби. Він запускається о 7:55 і о 16:55, незалежно від наявності оновлень даних про теплові аномалії, і використовує вже завантажені відомості про викиди тепла. Навіть за відсутності виявлених викидів тепла він запускає інші модулі, щоб створити карту (в цьому випадку «порожню») і надіслати її як звіт відповідним фахівцям ДСНС України. Функціонал інших керуючих модулів наведено в табл. 2.1.

Група завантаження і оброблення даних про зібрані супутниками викиди тепла щогодини перевіряє наявність оновлень від сервера NASA. Потім

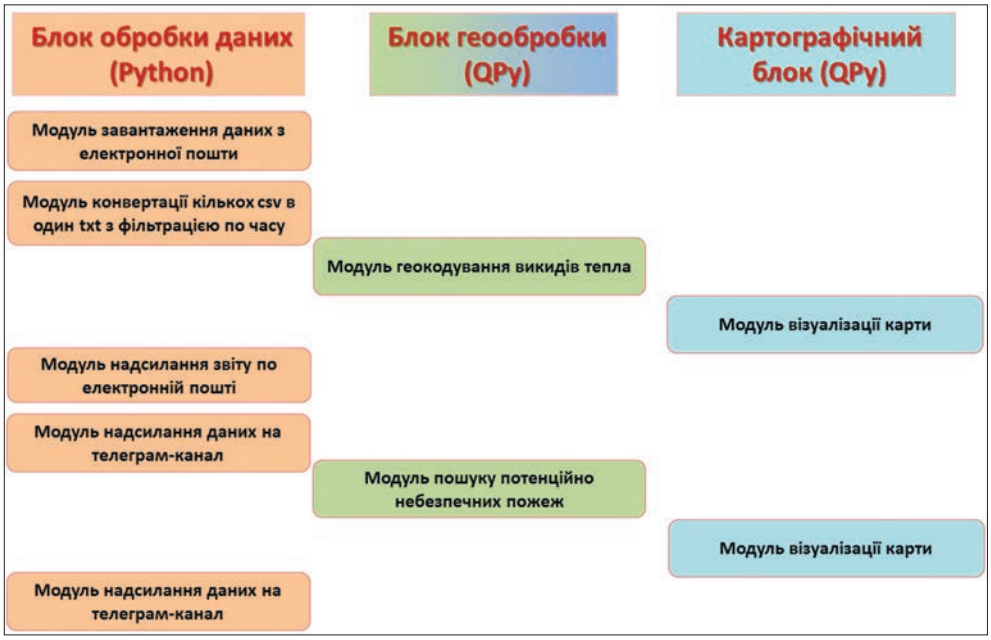


Рис. 2.3. Схема роботи Системи моніторингу

конвертує дані із формату scv у формат txt. Більш детально про їх функціонал див. табл. 2.2.

Група пошуку потенційно небезпечних пожеж складається з двох модулів (табл. 2.3). Перший здійснює пошук великих пожеж за критеріями, наведеними в попередньому підрозділі. Другий модуль відповідає за пошук потенційно небезпечних лісових пожеж.

Таблиця 2.1

Програмні алгоритмічні (керуючі) модулі Системи моніторингу пожеж

Назва	Призначення модуля
Create&SendFires Report	Виконує моніторинг пожеж і створює підсумкову карту викидів тепла за половину доби, надсилає її на електронну пошту, видаляє завантажені дані про викиди тепла з серверу NASA
AutoMonitoring	Запускає моніторинг пожеж, виготовлення карти викидів тепла і надсилає її на телеграм-канал
ManualMonitoring	Використовується для примусового запуску процедури моніторингу пожеж. У результаті виконання модуля створюється і відображається на екрані карта викидів тепла. На телеграм-канал та електронною поштою карта не надсилається

Таблиця 2.2

Функціональні модулі для завантаження і оброблення даних

Назва	Призначення модуля
Verify&Save&DelMail	Перевіряє наявність оновлення даних щодо викидів тепла на території України. У разі виявлення оновлень завантажує дані у форматі csv
ConvertFiles	Перевіряє сучасність даних про викиди тепла (щоб були не старіші, ніж за 5 годин), видаляє застарілі дані і конвертує файли csv у формат txt

Таблиця 2.3

Функціональні програмні модулі групи пошуку потенційно небезпечних пожеж

Назва	Призначення модуля
Define_DangerForest Areas	Здійснює пошук потенційно небезпечних лісових пожеж. У результаті його роботи утворюється файл із полігонами підозрілих на лісові пожежі ділянок
Define_DangerAreas	Здійснює пошук потенційно небезпечних великих пожеж. У результаті його роботи утворюється файл із полігонами підозрілих на великі пожежі ділянок

Група картографічних модулів складається з трьох модулів і створює три види карт:

1) карту викидів тепла і пожеж на об'єктах на всю територію України (рис. 1.12, рис. 1.13);

2) одну чи кілька карт потенційно небезпечних займань, тобто великих пожеж, якщо такі будуть виявлені;

3) одну чи кілька карт лісових пожеж, тобто великих пожеж (рис. 1.17, рис. 1.19, табл. 2.4).

Два останніх модулі практично однакові з точки зору змісту програмного коду, але відрізняються оформленням деяких елементів карт, які вони створюють, зокрема назвами цих карт.

Формування оперативних повідомлень і звітів виконується за допомогою ще двох модулів:

1) модуля генерації оперативних повідомлень в телеграм-каналі fires_monitoring_channel;

2) модуля формування звітів і їх розсилки електронною поштою на визначені адреси (табл. 2.5).

Таблиця 2.4

Картографічні модулі Системи моніторингу пожеж

Назва	Призначення модуля
CreateMap	Перетворює дані про викиди тепла із формату txt у формат shp (ShapeFile), виконує геокодування за кластерною картою, створює растрову карту викидів тепла
CreateMapForestFire Areas	Створює космофотокарти потенційно небезпечних лісових пожеж на основі файлу з відповідними полігонами
CreateMapDanger Areas	Створює космофотокарти великих пожеж на основі файлу з відповідними полігонами

Таблиця 2.5

Модулі формування оперативних повідомлень і звітів Системи моніторингу пожеж

Назва	Призначення модуля
Rename&SendTelegram	Виконує перейменування файлу карти, додаючи до його імені дату створення. Надсилає перейменований файл на телеграм-канал
Rename&SendMail	Виконує перейменування файлу карти, додаючи до його імені дату створення. Надсилає перейменований файл на визначений перелік адрес електронної пошти

Модуль оперативних повідомлень запускається, якщо є оновлення в даних і на їх основі хоча б одна карта успішно створена. Ця карта і завантажується у телеграм-канал. Для карти викидів тепла на території України додатково пишеться повідомлення: «Карта викидів тепла за…» і вказується дата і час виготовлення карти. Карти потенційно небезпечних пожеж, якщо вони створені, без повідомлення розміщуються за картою моніторингу.

Система моніторингу містить також два *сервісні модулі.* Перший модуль здійснює видалення тимчасових файлів, необхідних для складання

Таблиця 2.6

Сервісні модулі Системи моніторингу пожеж

Purge_MapFiles	Видаляє тимчасові файли, згенеровані під час створення карти в каталозі F:\SCRIPTS\FIRES\ TempData\
Purge_All	Видаляє тимчасові файли, згенеровані під час завантаження даних з сервера NASA і створення карти. Запускається після надходження всіх даних про викиди тепла за звітну половину доби, створення і успішного надсилання звітної карти моніторингу о 09:00 та о 21:00

Таблиця 2.7

Програмні каталоги підсистеми створення карти викидів тепла

Шлях	Вміст каталогу
F:\SCRIPTS\FIRES\Scripts	Програмні модулі (скрипти)
F:\SCRIPTS\FIRES\Scripts (копія)	Резервна копія програмних модулів на випадок їх випадкового видалення, пошкодження або перевірки функціональності
F:\SCRIPTS\FIRES\Images	Зображення для оформлення телеграм-каналу.
F:\SCRIPTS\FIRES\ MailData	Дані про викиди тепла, завантажені з сервера NASA
F:\SCRIPTS\FIRES\MapProc	Шаблони карт у форматі mxd і карта для геокодування викидів тепла. У папці /RasterBasis міститься растрова картографічна основа для карти викидів тепла
F:\SCRIPTS\FIRES\Obsolete	Застарілі програмні модулі, рішення яких можуть знадобитися для модернізації системи моніторингу
F:\SCRIPTS\FIRES\Planner	Задачі Планувальника Windows для перевірки наявності оновлень на сервері NASA і запуску системи моніторингу. Формат файлів: xml
F:\SCRIPTS\FIRES\ReadyMaps	Растри підсумкових карт викидів тепла у форматі jpg
F:\SCRIPTS\FIRES\TempData	Тимчасовий файл з даними про викиди тепла для створення карти

Таблиця 2.8

Додаткові програмні каталоги підсистеми пошуку потенційно небезпечних пожеж

Шлях	Вміст каталогу
F:\SCRIPTS\FIRES_IMAGERY\Admin	Одиниці адміністративного поділу: полігони України, області, райони; полігони Чорного і Азовського морів
F:\SCRIPTS\FIRES_IMAGERY\ModernizedBasis	Карта геокодування, оптимізована для визначення викидів тепла, які потрапляють лише на залісені території
F:\SCRIPTS\FIRES_IMAGERY\ReadyImagery	Тимчасове збереження космофотокарт потенційно небезпечних пожеж. Для економії місця на сервері ці карти не зберігаються в архіві
F:\SCRIPTS\FIRES_IMAGERY\Settlements	Збереження полігонів населених пунктів
F:\SCRIPTS\FIRES_IMAGERY\Test	Дані з викидами тепла, призначені для тестування підсистеми пошуку потенційно небезпечних пожеж

карт. По-суті, він видаляє геодані, за допомогою яких шаблон карти відображає актуальні дані. Другий модуль додатково видаляє вихідні дані про теплові аномалії, завантажені з серверу NASA. Функціонал цих модулів наведено в табл. 2.6.

В табл. 2.7 і 2.8 наведено файлові змінні (шляхи до каталогів), які Система моніторингу використовує для роботи. Для перегляду оперативних повідомлень користувачеві потрібно зайти на телеграм-канал fires_monitoring_channel (через веббраузер або в месенджер Telegram). Для отримування оперативних повідомлень необхідно підписатися на цей телеграм-канал.

Отже, в Системі моніторингу можна виокремити два режими її роботи. Перший — пошук потенційно небезпечних пожеж, який запускається модулем AutoMonitoring, якщо знайдено нові викиди тепла. Другий — моніторинг викидів тепла зі створенням звітних повідомлень, модуль Create&SendFires Report, запускається регулярно, мінімум двічі на добу.

2.4. Технологічна послідовність роботи Системи моніторингу. Збір та опрацювання супутникових даних

Процес роботи Системи моніторингу можна поділити на такі етапи:

- етап 1 — завантаження оновлених даних про викиди тепла;
- етап 2 — їх перевірка на актуальність і первинне опрацювання;

• етап 3 — геопросторосторове опрацювання;
• етап 4 — створення узагальненої карти на всю територію України;
• етап 5 — пошук потенційно небезпечних пожеж;
• етап 6 — створення карт таких пожеж;
• етап 7 — надсилання отриманої інформації.

Етапи 1—3 описано в цьому підрозділі, а етапи 5—7 — в наступному.

Збір даних про викиди тепла на території України. Оскільки територія України не охоплена геостаціонарними супутниками, як, скажімо, територія Японії або Північної Кореї, інформацію про викиди тепла можна отримати лише від геліосинхронних супутників (NOAA-20 і NOAA- 21, Suomi NPP, Terra і Aqua), про що детально йшлося у першому розділі цієї монографії. Дані цих супутників доступні на сервері за адресою: https://firms2.modaps.eosdis.nasa.gov/active_fire/#firms-txt.

Дані про викиди тепла постачаються з такими полями:

• latitude і longitude — географічні координати викиду тепла;

• bright_ti4 — температура яскравості каналу вогню, виміряна в кельвінах;

• scan і track (сканування і відстеження) — відображають фактичний розмір пікселя. Процес сканування видає приблизно 375 мегапікселів на надір;

• acq_date і acq_time — дата і час отримання даних про викид тепла у форматі всесвітнього координованого часу;

• satellite і instrument — назва супутника і сенсора, за допомогою якого зафіксовано теплову аномалію;

• confidence — оцінка якості даних, яка ґрунтується на сукупності проміжних величин алгоритму виявлення теплових аномалій. Вдень вогневі пікселі з низькою довірою можуть виникнути від блиску сонця;

• version — обробка даних, виконана близько до реального часу (в полі зазначено NRT — Near Real-Time) або стандартна обробка даних (без NRT);

• bright_ti5 — температура яскравості каналу пікселя теплової аномалії, виміряна в кельвінах;

• frp — передає потужність пікселя теплової аномалії в мегаватах (МВт);

• type (може набувати значень day або night) — частина доби, коли було виявлено теплову аномалію.

Завантаження і оброблення даних виконується за допомогою модуля Verify&Save&DelMail Системи моніторингу. Перед завантаженням модуль перевіряє наявність оновлень про викиди тепла на території України. Якщо оновлення є, електронна пошта містить непрочитані листи від адресата noreply@nasa.gov. У цьому разі модуль завантажує вкладені файли у форматі csv, і для зручності опрацювання перетворює їх у формат txt. Точніше, конвертування потрібне для спрощення розуміння і подальшого редагування програмного коду, оскільки з редагуванням текстових файлів фахів-

цю-непрограмісту простіше розібратися. Якщо завантажено кілька файлів csv, всі вони об'єднуються в один файл txt. Система моніторингу зберігає і відображає всі дані, завантажені за першу або другу половину доби, а не лише оновлення за останні 1—3 години.

Оброблення даних передбачає перевірку часу їх отримання. Застарілі термоточки, отримані раніше ніж за 5 годин, відкидаються. Час фіксації термоточки сервер NASA кодує у форматі GMT. Для перетворення у національний формат до GMT додаються 2 або 3 години, залежно від встановленого зимового чи літнього часу. З урахуванням зміни часу виправляється також календарне число (день місяця), якщо час фіксації пізніше 21:00 для літнього часу і 22:00 для зимового.

Двоетапне геокодування і генералізація викидів тепла. Спочатку з табличних даних про викиди тепла створюється геопросторовий графічний файл (shape-файл), який містить крім координат точок відомості про проєкцію, а також окремо зберігаються атрибути (тематична інформація). Цей файл можна відкрити в усіх геоінформаційних системах (ГІС), таких як ArcGIS, QGIS, GRASS, Digitals та ін. Це перший етап геокодування.

У таблиці атрибутів немає інформації про територію, на якій зафіксовано викид тепла. Це може бути як металургійний завод, так і лісова пожежа. Потрібно визначити також населений пункт, поблизу якого виявлено викид тепла. І насамкінець слід підрахувати сумарну потужність пожежі в межах одного просторового об'єкта (яких в Україні десятки тисяч). Якщо виконувати цей набір операцій (геокодування, обрахунки) для всіх зафіксованих викидів тепла, знадобиться досить потужна обчислювальна машина і процес необхідно буде поділити для виконання паралельних обчислень.

Проте для вирішення цієї проблеми є кращий спосіб, ніж «метод грубої сили». Можна «формалізувати» визначення матеріалу горіння, найближчого населеного пункту, підрахунок потужності викидів тепла за допомогою «заготовки», так званої карти геокодування. Остання містить ділянки, або кластери, в межах кожної з яких матеріал горіння однаковий, і назву населеного пункту, а підрахунок потужності горіння здійснюється сумуванням потужностей викидів тепла, які потрапили на цю ділянку. Такі ділянки (кластери) щільно прилягають одна до одної і покривають всю територію України. Для виготовлення карти геокодування було використано карту землекористувань.

У результаті перенесення викидів тепла на карту геокодування ми отримуємо набір полігонів, на кожний з яких потрапив як мінімум один викид тепла. Однак такий підхід має суттєвий недолік: цілісна пожежа, що охоплює кілька населених пунктів або кілька видів землекористування (луки і с/г угіддя) відображатиметься як певне число полігонів, які розміщуються поруч і мають спільні сторони. Потужність пожежі розподілеться пропорційно потужності викидів тепла, які потрапили на різні кластери карти

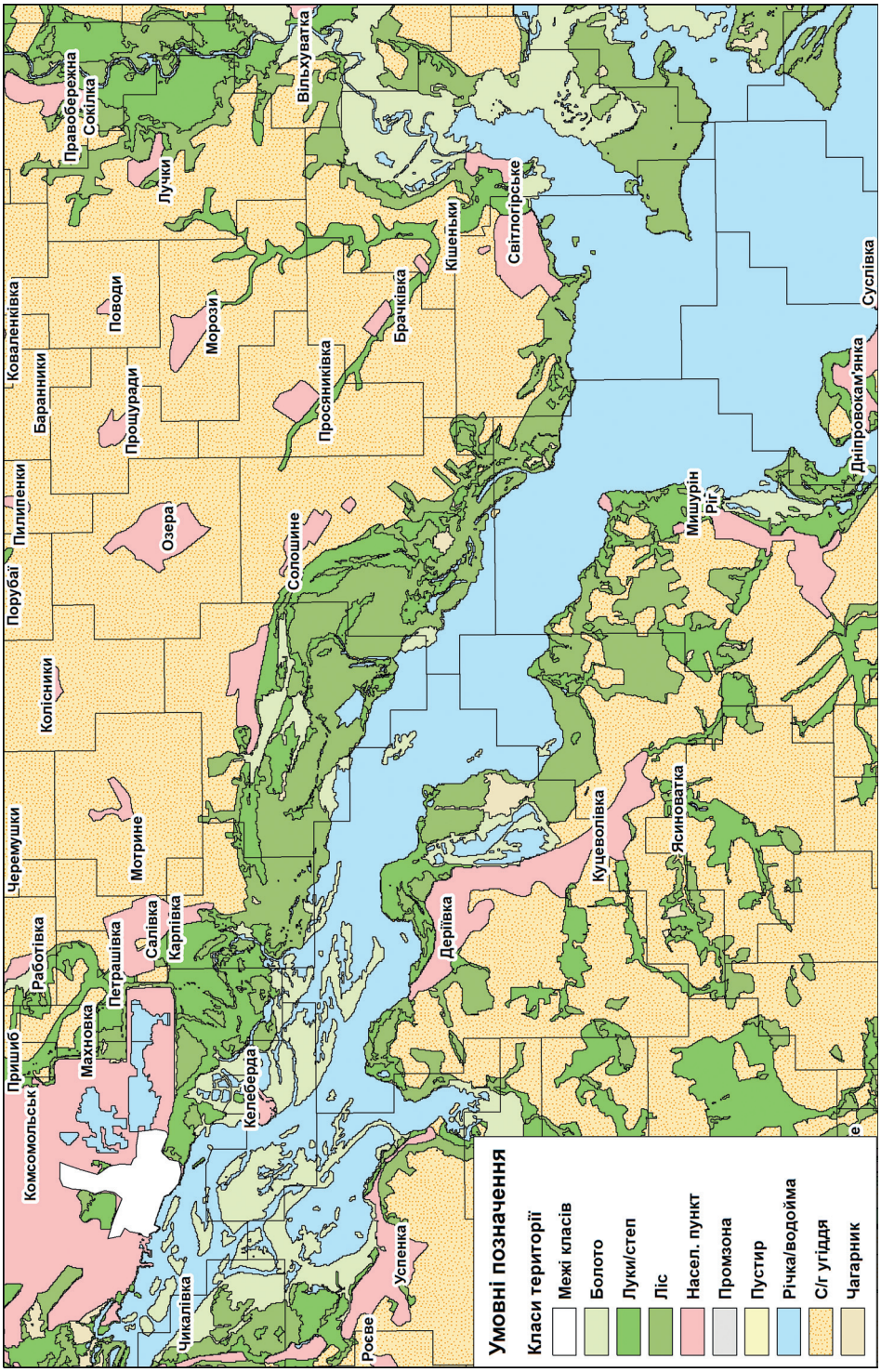


Рис. 2.4. Кластери території з позначенням класів земель з прив'язкою до населених пунктів для геокодування викидів тепла

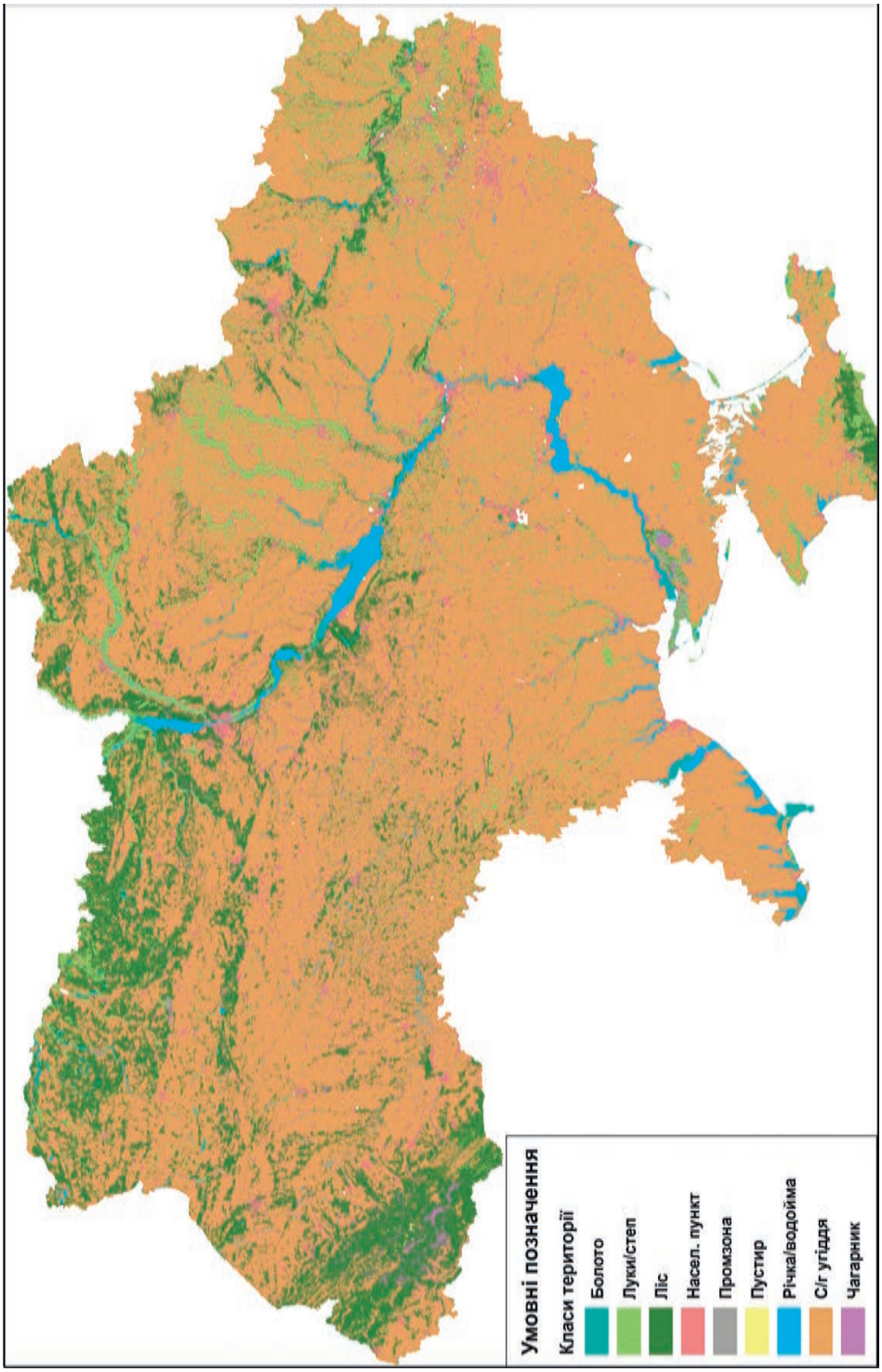


Рис. 2.5. Карта геокодування на всю територію України

геокодування. Тому сильне займання на полі, яке починає перекидатися на лісовий масив, відображатиметься як невелика лісова пожежа і велика пожежа на полі, що фактично є достовірним, але не передає небезпечності ситуації, що виникла.

Інакше кажучи, для оптимізації обчислювальний процес виконується «навпаки»: не викидам тепла присвоюється додаткова семантика, а викиди тепла переносять свої характеристики на карту геокодування. Кластери карти геокодування і стають тими об'єктами, які ми бачимо на фінальній карті України (рис. 1.16). Тобто всі геопросторові процедури виконуються в один етап. Цей «технічний компроміс» приводить до невеликої втрати точності, в середньому порядку кількох сотень метрів, що не важливо в масштабі карти України. Карта геокодування складається з кластерів, обмежених горизонтальними, вертикальними або довільними рамками (рис. 2.4). Якщо межа кластера збігається з природним контуром, вона проходить по цьому контуру. В інших випадках межі кластерів проходять на рівному віддаленні від найближчих населених пунктів у горизонтальному або вертикальному напрямку. Види кластерів більшою мірою збігаються з видами покриву земної поверхні (landuse/ landcover). На легенді карти ці види позначено кольором. Усього карта геокодування містить 969 066 об'єктів-кластерів (рис. 2.5) і займає 1,57 Гбайтів на диску. Використання вертикальних і горизонтальних ліній дозволяє в кілька разів зменшити розмір карти і підвищити швидкість роботи програми.

У результаті ми отримуємо лише ті кластери, на які потрапив хоча б один викид тепла з усіма потрібними характеристиками. Потім змінюємо геометричне представлення шару: шар із полігональними кластерами перетворюється на набір точок зі збереженням усіх характеристик кластерів. Це дозволяє застосовувати більше можливостей графічного відображення, і карта з точками виглядає досконалішою, ніж карта з мініатюрними контурами пожеж, тоді як збільшення контурів їх масштабуванням призвело б до спотворення інформації.

Проблему обрахунку реальної потужності цілісної пожежі було вирішено згодом, із застосуванням окремого програмного модуля. Цей модуль функціонує так. Спочатку визначається контур пожежі за крайніми точками викидів тепла. В межах цього контуру визначається сума теплової потужності. Якщо частина викидів тепла розміщена в межах лісового масиву, пожежа оцінюється як лісова.

2.5. Картографічні процеси в роботі Системи моніторингу

Створення карти викидів тепла на територію України. Загальноприйнятим у середовищі фахівців-програмістів рішенням цього завдання є розроблення окремої програми, яка візуалізує графіку на спеціальній канві

і розміщує підписи поряд із умовними позначеннями. Однак такий спосіб потребує значних трудовитрат. Тому, з огляду на ці міркування, його було відкинуто як неприйнятний. Натомість вирішено спробувати використати вже готові програмні комплекси, а саме геоінформаційні системи, які мають розроблені досконалі способи візуалізації карт. Потрібно «примусити» ГІС візуалізувати карту за наявними геоданими і експортувати цю візуалізацію в растрове зображення. Відповідно, розглядалися три способи.

1. Підготовка даних і експорт OLE (Object linked & Embedded). Цей спосіб означає можливість «вбудовування» документа карти в інший документ (скажімо, Microsoft Word). Вбудований документ карти візуалізується як зображення без рамок.

2. Запуск макросу (макропрограми, або сценарію оброблення) у відкритій програмі. Тобто можна оновити геодані, які потрібні для створення карти, завантажити ГІС і в її середовищі яким-небудь чином запустити макрос, який оновить шаблон карти і візуалізує його, а потім експортує цей шаблон в один із растрових форматів.

3. Візуалізація шаблону карти за підготовленим раніше shape-файлом з використанням «картографічного движка», або картографічного візуалізатора. який зазвичай входить у комплект програм ГІС, але його можна завантажити і запустити окремо. Зокрема такі движки використовують для створення WMS (від англ. Web Map Servive — тайлових картографічних сервісів). Тайловий сервіс візуалізує файли геоданих, наносить підписи і розбиває картографічне зображення на невеликі растрові фрагменти.

Найбільш зручним в реалізації виявився третій спосіб. Деякі геоінформаційні системи, наприклад ArcGIS або QGIS, мають вбудований картографічний візуалізатор, який може запускатися в командному рядку. Якщо створити шаблон карти, цей візуалізатор може його растеризувати. У шаблоні карти вже задані посилання на shape-файли і способи їх картографічного відображення та алгоритми підписування об'єктів. Тому завдання зводиться до підготовки геоданих для карти у форматі shape-файлів. Найбільш раціонально створювати таку карту шляхом зміни (перерисовки) заздалегідь створеного шаблону. Шаблон містить растрову підкладку (географічну основу), яка слугує для геоприв'язки, векторну координатну сітку, графіку масштабу і растрову легенду, а також шість тематичних шарів. Такий підхід (на відміну від рисовки елементів карти засобами Python) дозволяє розширити графічні можливості відображення змісту карти, оскільки всі зображувальні засоби ГІС професійного рівня стають доступними для використання через консоль, а створити шаблон можна в самій програмі, використовуючи її користувацький інтерфейс. У випадку карти викидів тепла і потенційно небезпечних пожеж створення тематичних шарів можна ще додатково оптимізувати. Замість шести наборів даних (які відображені в легенді карти, наприклад, рис. 1.16) можна використати один набір геода-

них, а відображення кожного з шарів сформувати індивідуально з використанням запитів для відбору елементів змісту для відображення. При цьому один шар відображає значки для займань потужністю понад 1000 МВт, інший — від 200 до 1000 МВт включно і т.д. Тобто у шаблоні карти використовується один шар, дубльований шість разів. У результаті, ми отримуємо на карті шість умовних позначень, розділених порівну на два класи: для контрольованих викидів тепла і для потенційно небезпечних викидів тепла. Умовні позначення об'єктів, крім поділу на контрольовані і потенційно небезпечні (горіння лісу), відображаються ще кольором і класифікуються за потужністю. Малопотужними вважаються пожежі до 199 МВт включно (їх зображують точками), середніми — від 200 до 999 МВт (зображують кружечками), потужними — понад 1000 МВт (їх зображують вогником).

Якщо на карті небагато об'єктів із займаннями, їх підписують всі. Якщо частина підписів не вміщається на карті, пріоритет віддають неконтрольованим займанням, навіть середнім за потужністю, а потім вже підписують великі, але контрольовані займання. Викиди тепла понад 1000 МВт і неконтрольовані займання понад 200 МВт показуються всі, навіть якщо вони накладатимуться один на одного.

Після створення нової карти шляхом перерисовки шаблону (у форматі mxd) за оновленими геоданими та її експорту растрова карта отримує стандартну назву, до якої за допомогою відповідного модуля додається дата і час створення карти.

Визначення потенційно небезпечних ареалів пожеж. Цей процес є найважчим з точки зору розроблення алгоритму прийняття рішень щодо класифікації пожеж і його програмної реалізації. Сам алгоритм досить складно описати, оскільки під час класифікації пожеж виникає багато проблем, але його можна просто подати у вигляді такого запиту:

[Сумарна потужність >200 МВт OR Викид тепла >10 МВт OR Площа >3000 га OR Матеріал = Ліс AND Сумарна потужність >40)] U [Сумарна потужність >300 МВт OR Площа >10000 га].

Проблема полягає в тому, що найбільш потужні пожежі є штучними і контрольованими. Це переважно спалювання відходів сільськогосподарського виробництва, яке здійснюється після збирання врожаю. Тому *першим критерієм відбору є матеріал горіння.* Викиди тепла на сільськогосподарських угіддях можна вважати умовно безпечними, так само, як і викиди тепла в межах промислових зон, на територіях яких вони відбуваються регулярно.

Усі критерії враховуються одночасно, але високе значення будь-якого одного з цих критеріїв є підставою для винесення пожежі до розряду небезпечних. Лісові пожежі виділяються в окремий клас і обробляються за іншим алгоритмом.

Другим критерієм є потужність. Викид тепла понад 1 ГВт (1000 МВт) однозначно потребує уваги. Він не може виникнути на полях, оскільки досить проблематично зібрати в одному місці таку кількість стерні. Для прийняття правильного рішення слід підрахувати потужність всієї пожежі, навіть якщо вона має кілька осередків, розташованих на відстані не більш як 2 км. Тому алгоритм ідентифікації пожеж утворює їх ареали, об'єднуючи сусідні викиди тепла в один полігон. Для утвореного полігону підраховується сумарна потужність, яка складається з потужностей усіх викидів тепла, що потрапляють у межі полігону. Віддалені викиди тепла не враховуються.

Третім критерієм є площа ареалу пожежі. Пожежа вважається потенційно небезпечною, якщо охоплює понад 3 тис. га для лісового займання або 10 тис. га для інших видів матеріалів горіння. Значення цих показників було вибрано, спираючись на кількарічний досвід моніторингу пожеж у «ручному режимі».

Так чи інакше, в результаті роботи алгоритму ми отримуємо два набори геопросторових даних у вигляді полігонів з атрибутами, які відповідають потенційно небезпечним лісовим пожежам та потужним займанням з інших матеріалів горіння.

Створення набору карт потенційно небезпечних пожеж. Цей процес складається з кількох етапів. Спочатку здійснюється розрахунок екстенту (відображуваної території) для шаблону карти. Екстент (площа картографування) визначається проведенням буфера навколо ареалу пожежі діаметром 5 км. Цей буфер і визначає розміри карти, але на ній не відображається.

Якщо ареали пожеж розміщені поряд і можуть поміститися на одній карті, то нераціонально створювати карти для кожного з них. Тому розміщені поряд ареали (відстань менше 6 км) об'єднуються.

Число створюваних карт заздалегідь невідоме. Відповідно, визначається кількість ареалів і задається цикл створення карт. Шаблон уже містить усі ареали пожеж і весь зміст карт — всі викиди тепла, населені пункти, космічний знімок. У циклі змінюється лише екстент карти і здійснюється її експорт. У результаті отримуємо набір растрових карт з різними назвами, кожна — на свою пожежу.

Формування оперативних повідомлень. Найбільш зручним способом «доставки» користувачам результатів роботи Системи моніторингу є «канал» або «група» месенджера (сервіс миттєвих повідомлень через Інтернет). Найбільш придатним для цього виявився Telegram, який має досконалий програмний інтерфейс (api) і наявні розширення для систем програмування (telegrambotapi для Python). Модуль системи надсилає карти як фотографії, є також можливість надсилати текстові повідомлення. Канал забезпечує одночасний доступ до результатів роботи Системи моніторингу кількох осіб. У такий спосіб реалізується ідентичність інформації, переданої фахівцям. Крім того, на прохання фахівців ДСНС України реалізовано

автоматичну доставку електронною поштою звітних повідомлень про стан ситуації з пожежами.

Модуль оперативних повідомлень запускається, якщо було успішно створено хоча б одну карту. Ця карта завантажується у телеграм-канал. Для карти викидів тепла на територію України додатково пишеться повідомлення: «Карта викидів тепла за…» і вказується дата і час виготовлення карти.

Модуль надсилання звітної карти запускається о 7:50 і о 16:50. Орієнтовно за 10 хв оброблюються всі дані і створюється карта, яка надсилається як вкладення у поштове повідомлення.

2.6. Геопортал системи моніторингу

Підсистема інформування і оперативних повідомлень Системи моніторингу складається з телеграм-каналу, повідомлень на електронну пошту та геопорталу. Структуру цієї підсистеми наведено на рис. 2.6, а зображення екрана із завантаженим геопорталом — на рис. 2.7.

Наявний на сьогодні геопортал доступний за адресою https://geoportal.uhmi.org.ua. Він фактично є вебкартою, зміст якої динамічно оновлюється за допомогою Системи моніторингу пожеж. Інтерфейс геопорталу складається з таких елементів, як картографічне зображення, назва ресурсу, панелі керування масштабом і шарами, легенда, графічний масштаб, логотип УкрГМІ, а також зазначення авторського права. Переважна більшість елементів інтерфейсу геопорталу реалізується за допомогою базового функціоналу бібліотеки Leaflet. Картографічне зображення складається з картографічної підкладки, на яку накладається векторна картографічна основа адміністративно-територіального устрою України (межі районів і громад). Векторна основа дозволяє інтерактивно взаємодіяти з її складовими, зокрема отримувати довідку за кліком мишею на відповідному елементі. На ці дані накладається тематична інформація про:

- викиди тепла (маленькі і середні червоні точки);
- об'єкти, на яких зафіксовано викиди тепла (сині і червоні вогники різного розміру);
- ареали пожеж із зазначенням їх потужності.

Панель керування шарами дозволяє змінювати картографічну підкладку (OSM, Google Maps, супутникові знімки від різних постачальників геоданих тощо). Ця панель дає також змогу керувати векторною частиною геопорталу (вимикати відображення районів і громад,) а також відображенням тематики. Тематичні дані є інтерактивними: клікнувши на елементі, можна отримати довідку в окремому вікні про вихідні дані, які були задіяні у формуванні цього елемента змісту.

Для того щоб забезпечити в подальшому можливість розширення функцій геопорталу сторонніми спеціалістами, його створення здійснюва-

Рис. 2.6. Структура підсистеми інформування і оперативних повідомлень

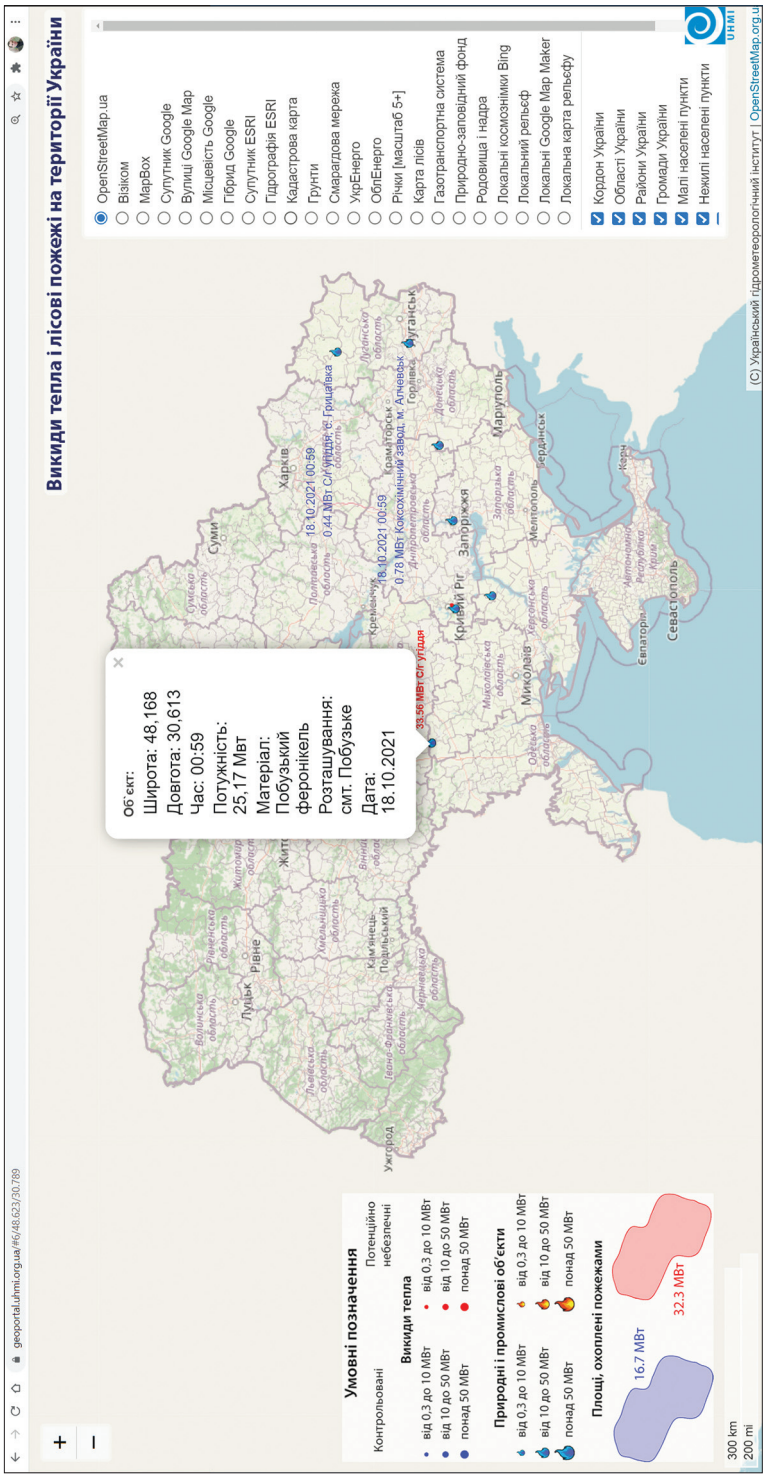


Рис. 2.7. Геопортал Системи моніторингу пожеж

лося в текстовому редакторі Notepad++ (безкоштовний), без використання інтегрованих середовищ розроблення програм. Фрагменти програмного коду розміщені у файлах скриптів, а сам програмний код тестувався за допомогою веббраузера.

2.7. Технологічні обмеження і обслуговування пристроїв користувачів

Під час створення Системи моніторингу через обмеженість виділених на це ресурсів довелося застосувати певні технічні «компроміси». Один із них — це використання не картографічного візуалізатора (або картографічного движка, на зразок MapAround), а готової геоінформаційної системи, скриптові інструменти якої використовуються як для оброблення геоданих, так і для візуалізації карти. Ще один компроміс — використання інтерпретованої мови програмування Python, а не компільованої професійної C++. Це дозволило швидко розробити базовий код і запустити в роботу Системи моніторингу. Планувалося, що згодом, після затвердження її концепції, всі ці «компроміси» будуть ліквідовані. Однак на сьогодні більшість із них залишилася, тому правильно буде вказати найбільш важливі з них. Це потрібно також для розуміння користувачами особливостей програми, щоб врахувати їх під час своєї роботи з нею.

Повнота виявлення пожеж. Система моніторингу не завжди виявляє всі викиди тепла. По-перше, це обмеження зумовлене чутливістю спектрорадіометрів (для VIIRS — 0,2 МВт). Тобто багаття, розведене на полі, система не зафіксує, оскільки випромінювання від нього є нижчим за рівень шуму. Проте малоінтенсивне горіння трави на великій площі Система зафіксує.

По-друге, фіксуються лише інфрачервоні хвилі, які виділяються в напрямку до супутника. Через це тління сміттєзвалищ, торфовищ, териконів, горіння підстилки в лісі сенсори супутника фіксують не завжди. Найкраще визначається відкритий вогонь на значній площі. Хмарний покрив також розсіює теплові хвилі, а тому пожежі з невисокою і середньою інтенсивністю за таких погодних умов не будуть зафіксовані. Водночас потужні викиди тепла навіть за щільного хмарного покриву відображаються Системою моніторингу, оскільки їм відповідає зростання теплового фонового випромінювання на великій площі.

По-третє, викиди тепла фіксуються лише в момент прольоту супутника над територією (рис. 1.2). Супутник Suomi NPP пролітає над Україною о 02:33 і о 03:47 вночі і о 12:43 і 14:25 вдень; NOAA-20 — о 03:47 і 13:22; Terra — о 02:35 і 03:30; Aqua — о 02:35, 03:30, 13:05 і 14:45.

Неточності у підписах об'єктів. Щодня за ясної погоди на території України виявляється до 100 викидів тепла. Тому всі підписи не вміщаються на карті. Пріоритет віддається потенційно небезпечним викидам тепла перед контрольованими, а більш потужні викиди тепла мають пріоритет

перед менш потужними. Тому не всі критичні пожежі (неконтрольовані і потужні) можуть бути підписані. Обов'язково підписуються неконтрольовані пожежі потужністю понад 200 МВт, навіть якщо їх підписи накладаються один на одного. Решта викидів тепла підписуються тільки в тому разі, якщо на карті є вільне місце.

Надмірна точність у виявленні пожеж. Критерії для класифікації пожеж як потенційно небезпечних встановлено так, щоб більшість пожеж поряд з лісовими масивами потрапляли у цю категорію і інформація про них передавалася в телеграм-канал. Вважається, що оператор візуально відбракує надмірні повідомлення. Так зроблено тому, що не можна допустити, щоб небезпечне займання на початковій стадії виявилося пропущеним з тих чи інших причин.

Помилки в роботі програмного забезпечення. Під час роботи Системи моніторингу було виявлено деякі помилки.

Неповне прорисовування карти може відбутися внаслідок нестачі системних ресурсів, через що стає недоступним один із файлів з геоданими, який бере участь у формуванні зображення карти. Віртуальна машина (ПК) Системи моніторингу використовує 16 ядер процесора, однак частота ядер невелика, близько 2 ГГц (типова тактова частота на 2002 р.). У разі виявлення значної кількості викидів тепла Система моніторингу може не сформувати файл, або він створюється лише частково, тому карта може прорисуватися без викидів тепла. Причиною неповного прорисовування карти може бути також збій інтерпретатора ArcPy під час візуалізації шаблону карти. На рис. 2.8 зображено випадок, коли віртуальна машина не встигла закінчити об'єднання сусідніх полігонів потенційно небезпечних ділянок, але карта була прорисована з неправильними ділянками і без викидів тепла. Карту на рис. 2.9 було створено пізніше і вона прорисована правильно. Цю проблему можна вирішити використанням більш досконалої системи програмування і переписанням програмного коду із застосуванням бібліотеки GDAL.

Ненадсилання звіту на електронну пошту. Сервер електронної пошти використовує сертифікат безпеки (https). Цей сертифікат платний, але є безкоштовна версія, яка потребує перевстановлення сертифікату щомісяця. Тому електронне повідомлення може отримати недійсний сертифікат і буде заблоковано сервером відправника або адресата. Загалом розсилка електронною поштою результатів моніторингу пожеж є вже застарілим підходом, і в подальшому має бути застосовано більш досконале рішення, наприклад використання системи електронного документообігу АСКОД.

Створення карти без викидів тепла («порожньої» карти) може статися з різних причин. Через неточно визначений державний кордон сервер NASA іноді надсилає дані про викиди тепла, які не потрапляють на територію України (покриту кластерами карти геокодування). Оскільки оновлен-

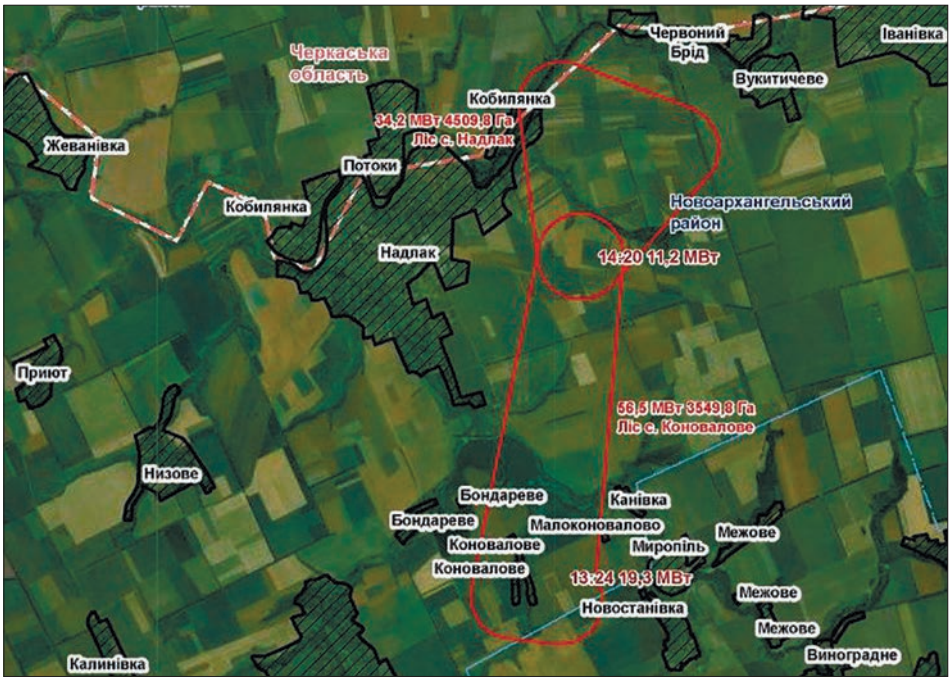


Рис. 2.8. Фрагмент космофотокарти з непрорисованими викидами тепла

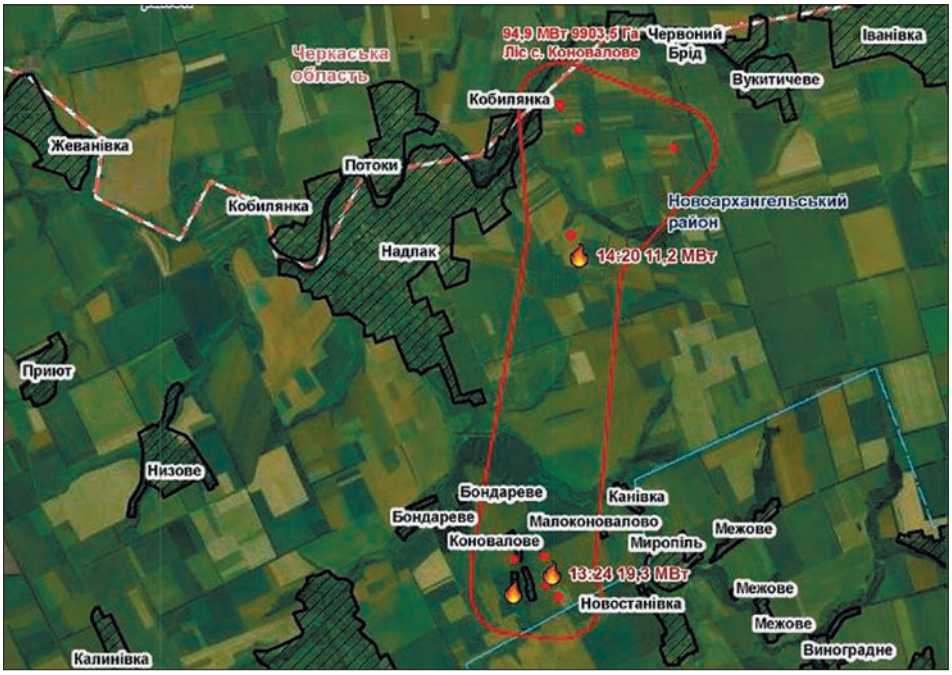


Рис. 2.9. Фрагмент космофотокарти з усіма прорисованими шарами

ня даних відбулося, система моніторингу розпочне роботу і буде створена карта викидів тепла без самих викидів. Крім того, інколи сервер NASA надсилає викиди тепла потужністю менше мінімальної, для яких на карті немає умовних позначень. Усі ці недоліки можна виправити модернізацією програмного забезпечення.

«Зависання» програми внаслідок неприпинення виконання інтерпретатора Python. Програмне забезпечення, написане з використанням інтерпретованих мов програмування, має кілька недоліків. До них належать повільне виконання задач і можливі збої у роботі програми, яка до цього працювала нормально. З іншого боку, Python дозволяє швидко писати програмне забезпечення і правити код програми навіть у процесі її роботи. Python ідеально підходить для погано зумовлених проєктів, тобто з неточно невизначеними вимогами, які можуть змінюватися в процесі розроблення програми, або для задач, які вирішуються вперше.

Програма на Python є текстовим документом, (а не exe-файлом), який виконується за допомогою іншої програми — інтерпретатора. З причин, які не розкриваються в документації Python, його інтерпретатор не завжди завершує роботу коректно. Він може продовжувати працювати, не споживаючи системних ресурсів. Тому новий запуск програми не може відбутися, оскільки вона вже запущена. Відповідно, є ймовірність, що моніторинг пожеж не буде виконано.

Цей недолік можна виправити двома способами. Перший — у програмному коді потрібно прописати процес «закриття» інтерпретатора після закінчення виконання коду, що не зовсім надійно і не завжди гарантовано спрацьовує. Другий спосіб більш радикальний і ефективний — необхідно переписати програмний код на компільованій мові програмування, наприклад на C або Delphi, але перед цим система моніторингу має бути вже повністю розробленою з врахуванням усіх зауважень і побажань.

Неточності у відображенні пожеж. Визначення матеріалу горіння, найближчого населеного пункту, підрахунок потужності викидів тепла за допомогою карти геокодування має в своїй основі певну неточність. Підрахунок суми потужності викидів тепла здійснюється не для всього займання, а для окремої ділянки (кластера). Для дуже великих кластерів осередок вказується по центру їх розташування, тоді як пожежа може виникнути на його краю. Відповідно, відстань між сусідніми осередками може стати значною, що не дозволить фахівцю встановити взаємозв'язок між ними. Якщо ж спробувати оконтурити займання, складно коректно визначити для нього матеріал горіння. Оскільки машина не може визначити матеріал для полігона, який потрапляє на різні типи земного покриву, тобто якщо одночасно горить кілька матеріалів і пожежа охоплює кілька кластерів. Можна утворити центроїд пожежі і він гарантовано потрапить лише на один кластер. Проте центроїд може потрапити на відносно невеликий кластер

(наприклад, річку) і тоді займання її залісених берегів не буде відображено. Правильний вибір рослинного покриву досить складно реалізувати, і це може привести до того, що невеликі площі початкового займання лісових масивів будуть пропущені. Тому, можливо, неточне відображення пожеж допомагає більш точно їх оцінити.

Необхідність очищення пам'яті пристроїв користувачів. Пристрої на основі операційних систем Android та iOS, як правило, мають відносно невелику внутрішню пам'ять — близько 16 Гбайтів (точний об'єм пам'яті, вказано в документації до пристрою). Як правило, після встановлення всіх додатків залишаються вільними від 6 до 12 Гбайтів внутрішньої пам'яті. Месенджер Telegram використовує внутрішню пам'ять пристроїв для збереження зображень, завантажених під час їх перегляду, для економії інтернет-трафіку і зниження навантаження на сервер. Тому користування телеграм-каналом fires_monitoring_channel, як і будь-яким іншим, поступово зменшує обсяг доступної пам'яті пристрою.

З метою оптимізації роботи мобільних платформ, система оповіщення налаштована так, що стискає зображення, які надсилаються до телеграм-каналу: зображення у форматі JPEG з роздільною здатністю 3509×2481 пікселів об'ємом 6—8 Мбайтів стискається до 0,2 Мбайтів. Отже, перегляд п'яти зображень відбирає 1 Мбайт внутрішньої пам'яті пристрою. Щоб повністю зайняти всю пам'ять, потрібно переглянути 50 000 зображень (теоретично це всі створені карти за 10 років). Однак рекомендується періодично (1 раз на рік) видаляти зображення, які містяться в папці /Telegram/Telegram Images/.

Для операційної системи Windows зображення Telegram містяться в папці C:\Users\user\AppData\Roaming\TelegramDesktop\tdata\user_data\cache\0. Оскільки потужність комп'ютерів на Windows набагато більша, кеш-пам'ять можна не очищати. Для iOS процес очищення пам'яті не передбачений, оскільки папка прихована від користувача.

Очищення пам'яті сервера електронної пошти. Підсистема звітності готує дві звітні карти викидів тепла розміром 6—8 Мбайтів і щодня надсилає їх на поштовий сервер ДСНС України. Розмір виділеної пам'яті для одного користувача в деяких поштових серверів (наприклад, ukr.net) становить 4 Гбайти. Тому рекомендується щомісяця видаляти неактуальні повідомлення.

2.8. Потенціал вдосконалення програми

На сьогодні розроблено першу версію картографічно-аналітичної Системи моніторингу викидів тепла та виявлення потенційно небезпечних пожеж. Однак цей програмно-апаратний комплекс потребує модернізації. Серед основних напрямів робіт з удосконалення Системи моніторингу слід назвати такі.

1. *Удосконалення роботи геопорталу*. З цією метою ми ознайомилися з попередніми розробками, картографічними сервісами, електронними каталогами і атласами. Було виявлено, що якісні геопортали складаються з трьох частин, які розміщуються на спеціалізованому виділеному сервері. Це вебоболонка, серверна частина і частина користувача.

Найбільш перспективним напрямом є розроблення якісної вебкарти, оптимізованої для використання обчислювальних можливостей відеокарти, зі спеціалізованим інтерфейсом, який повинен за потреби задіювати обчислювальні ресурси комп'ютера користувача. На вебкарту виводитимуться результати роботи сервісу — викиди тепла і виявлені пожежі, а також картографічна підкладка (географічна основа), яка дозволяє здійснити просторову прив'язку тематичного змісту.

Якісний ресурс додатково має текстово-графічну оболонку, фактично сайт, яку надалі називатимемо вебоболонкою. Вона виконує багато функцій: ознайомлює зі змістом ресурсу, слугує для індексації його пошуковими системами (на зразок Google або Bing), пояснює зміст карт, здійснює авторизацію користувачів тощо. Така вебоболонка була б дуже корисною для Системи моніторингу, оскільки за її допомогою можна було б реалізувати багато функцій, крім уже перелічених. Зокрема, забезпечити доступ до раніше створених карт викидів тепла та їх перегляд, відображення логу (протоколу роботи) Системи, створити вебінтерфейс керування роботою Системи моніторингу.

Частина back-end геопорталу — це програмне забезпечення, яке виконується на сервері. Back-end складається з картографічного вебсервера, який здійснюватиме візуалізацію вебкарт і передаватиме растрові тайли на вебкарту. Наразі ця робота виконується комп'ютером користувача, що приводить до уповільненої роботи Системи моніторингу. У своєму складі back-end має містити тайловий сервер, який зберігає картографічні основи (фізико-географічну підкладку і космічні знімки, а також тематичні шари). Необхідний об'єм сховища — від 4 Тбайтів, обчислювальна потужність — від 16 ядер процесора 2,5 ГГц, оперативна пам'ять — 32 Гбайти. Back-end також має містити базу даних викидів тепла, базу даних виявлених пожеж і реалізовувати її виведення на вебкарті. Ймовірно на back-end буде покладено прийом даних від супутників NASA і серії Sentinel.

Власний сервер підвищить стабільність роботи Системи моніторингу — незалежність від комерційної політики постачальників карт (Google, Microsoft, Here, Mapbox, Держгеокадастру) і наявності закордонного Інтернету. Структуру сервера наведено в статті [32].

Оптимальну структуру повнофункціонального геопорталу наведено на рис. 2.10.

2. *Візуалізація космофотокарт*. Для цього Система моніторингу використовує вбудовану картографічну основу, яка щоразу завантажується з

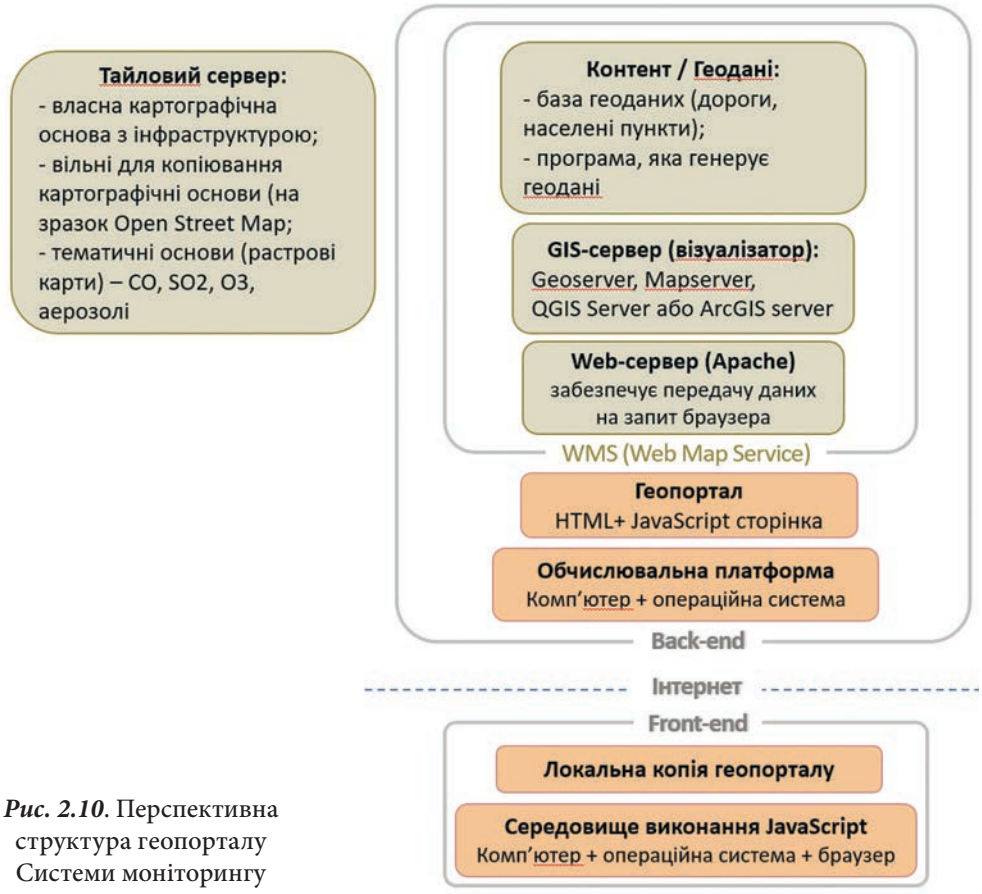


Рис. 2.10. Перспективна структура геопорталу Системи моніторингу

мережі Інтернет. Є ризик, що ця картографічна основа через якийсь час виявиться недоступною. Тому слід створити растрову картографічну основу шляхом завантаження тайлів із геопорталів і розмістити її на диску.

3. *Система оперативних повідомлень.* Повідомлення мають передаватися захищеними лініями зв'язку, сертифікованими ДСНС України. Проте на сьогодні для передачі даних використовується хоча і надійна та сертифікована, але відкрита лінія інтернет-мережі (з дійсним ssl-сертифікатом). Отже, потрібно перейти на закритий шифрований канал повідомлень. В ідеалі це має бути окремий месенджер, орієнтований виключно на оперативні повідомлення і виділений сервер для його обслуговування.

4. *Внутрішній і зовнішній контроль роботи системи.* Слід забезпечити внутрішній і зовнішній контроль роботи Системи моніторингу з фіксацією виконуваних команд у протоколі (ведення логу). Робота програмного забезпечення, написаного на Python, викликає чимало зауважень у професійних розробників. Частину збоїв важко пояснити, і хоча вони виникають

досить рідко, це не додає надійності таким системам. Відповідно, всі модулі мають містити засоби контролю за їх роботою, а кожний модуль під час запуску і після закінчення роботи повинен записувати у спеціальний файл всю технічну інформацію: початок і час роботи, вхідні дані, кількість циклів рекурсії, час закінчення роботи модуля, спосіб закінчення роботи, стан комп'ютерної системи. Цей лог має бути доступним зі смартфона в будь-який час.

5. *Більш точна модель оброблення даних про викиди тепла і виявлення пожеж*. По-перше, потрібно оновити карту геокодування. Карта має містити цілісні об'єкти, на яких можуть виникнути і раніше виникали займання. Це зменшить кількість пожеж, поділених між кластерами, і потужні займання відображатимуться як цілісні.

Найкраще, якщо модель геокодування правильно оконтурюватиме займання і визначатиме ступінь його небезпеки, оцінюючи відсоткову частку охоплення площ із тим чи іншим рослинним покривом. Також має бути врахований рослинний покрив ділянок, розміщених поряд. Тобто йдеться про розроблення нової, чисельної моделі обрахунку ступеня пожежної небезпеки за даними супутникового сканування.

6. *Автоматична підтримка працездатності сервера*. Передбачається, що об'єм пам'яті сервера Системи моніторингу достатній для роботи впродовж 10 років. Однак було б бажано реалізувати автоматичне резервне копіювання та очищення дискового простору.

7. *Мова програмування*. Систему моніторингу написано на Python і ArcPy, які не є надійними і достатньо швидкими з точки зору виконання програм. Варто весь код на Python переписати мовою C, а весь код для бібліотеки ArcPy по можливості слід замінити на код з використанням бібліотеки GDAL. Крім того, необхідно реалізувати багатопоточність програми.

8. *Отримання даних*. Дані щодо викидів тепла завантажуються з сервера NASA. Слід знайти можливість для отримання даних напряму з супутників. Це збільшить оперативність отримання відомостей про пожежі.

9. *Розсилка звітних повідомлень*. На сьогодні звітні повідомлення про викиди тепла на території України розсилаються електронною поштою. Потрібно реалізувати інший механізм, щоб ці повідомлення, зокрема й попередні, були доступними для користувачів у більш простий спосіб, наприклад із використанням сервісу FTP.

2.9. Створення бази даних великих лісових пожеж

Як уже зазначалося у розділі 1, тепловізійна супутникова зйомка земної поверхні, дані якої розміщені у вільному доступі, розпочалася з 2000 року. Архів теплових аномалій, розміщений на сайті NASA, є досить цінним з наукової точки зору. Він може знадобитися, зокрема, для ретроспек-

тивного аналізу пожеж. Більшість пожеж мають штучне походження і є контрольованими, наприклад, пожежі на полях. Однак пожежі в лісових масивах — це нетипове і небажане явище, незалежно від причини їх виникнення. Особливу небезпеку становлять лісові пожежі, які охоплюють значні території. База даних лісових пожеж допоможе у їх вивченні і дозволить розробити методику запобігання їх виникненню. Крім того, ця база даних може стати складовою частиною геопорталу, призначеного для моніторингу пожеж. Вона буде корисною також для аналізу ступеня пожежної небезпеки, оскільки відображає час виникнення лісових пожеж, їх локалізацію і охоплювану ними площу. І головне — створення бази даних лісових пожеж дасть змогу оцінити якість роботи Системи моніторингу порівнянням її з результатами фіксації пожеж, виконаних Державною службою авіаційного моніторингу пожеж.

Для виконання такого дослідження потрібно завантажити весь архів теплових аномалій від початку проведення спостережень і опрацювати його, створивши геопросторовий shape-файл, який міститиме всі теплові аномалії. Програмний код Системи моніторингу можна розширити так, щоб він здійснював вибірку аномалій на певну дату і виконував їх опрацювання у стандартний спосіб. Знайдені пожежі можна записувати в базу даних і на кожну з них робити окрему карту. Це дозволить, крім наочного відображення пожеж, здійснювати контроль роботи програми і оцінювати якість створеної бази даних.

2.9.1. Підготовка даних про теплові аномалії

Архівні результати супутникових спостережень на територію України доступні, починаючи з такого часу:

- для MODIS C6 — з 1 листопада 2000 року (для Terra) та з 4 липня 2002 року (для Aqua), загалом 597 275 викидів тепла;
- для VIIRS 375 м (S-NPP) — з 20 січня 2012 року, загалом 914 924 викиди тепла;
- з VIIRS 375 м (NOAA-20) — з 4 грудня 2019 року, загалом 49 252 викиди тепла.

Ці вихідні дані було завантажено з сайту Fire Information for Resource Management System [20]. На цьому ресурсі дані можна отримати в одному з трьох форматів: SHP, KML, TXT/CSV. Перші два з них є варіаціями геопросторових даних, які вже готові для нанесення на карту. Текстовий формат більш зручний для опрацювання. Структуру цих даних детально викладено в підрозділі 2.4.

Оскільки обсяг цих даних перевищує мільйон, не всі вони відразу можуть бути завантажені в електронну таблицю для опрацювання. Відповідно, слід відкинути «зайві» дані, які не використовуватимуться для пошуку пожеж. Такими даними є викиди тепла на незалісених ділянках, адже біль-

шість пожеж відбувається не в лісах, а на сільськогосподарських угіддях. Тому перед початком пошуку лісових пожеж слід відокремити залісені площі від решти території України. Для цього потрібна детальна карта лісів. Проблема полягає в тому, що кадастрова карта недоступна для вільного користування, а її отримання ускладнено бюрократичними перешкодами (карта містить відомості про землекористувачів). Крім того, вона недостатньо точна. Офіційна карта масштабу 1:200 000, яку використовує ДСНС України, є застарілою: в Україні постійно відбуваються масові вирубування лісів і показані на цій карті заліснені території на сьогодні фактично є вільними від дерев, тому лісові пожежі на цій території виникнути не можуть.

Серед доступних карт найбільш точною виявилася карта OSM (Open Street Map) [33]. Її редагують волонтери, а також державні та приватні підприємства для власних потреб, і вона оперативно відображає зміни на території дослідження. Актуальність цієї карти було перевірено за космічним знімком 2020 року з геопорталу Google Maps. Таку саму перевірку було проведено після виділення займань, тобто під час аналізу карт пожеж.

Після перевірки ми завантажили останню версію OSM із сайту Street Map Data Extracts [34], в ній виокремили шар типів землекористування, з якого виділили і зберегли полігони лісів. У геоінформаційній системі QGIS на початку із текстових файлів створили геопросторові файли SHP. Таких файлів було створено порядку 10, приблизно по 250 тис. викидів тепла в кожному, щоб не перевантажувати операційну систему. Послідовно в кожному файлі виділили ті точки викидів тепла, які потрапляють на залісену територію і 500 м поза нею. Виділені об'єкти зберегли в окремих файлах. У подальшому SHP-файли перетворили знову в текстові й імпортували в електронну таблицю. Загалом так було отримано 131 тис. викидів тепла, які відбулися на території лісових масивів або в безпосередній близькості до них.

Якщо всі ці викиди тепла, зафіксовані на залісненій території України, нанести на карту одночасно, то виділити окремі осередки пожеж буде неможливо. Всі точки покриють територію досить щільної осередки накладатимуться один на одного. Відповідно, всі пожежі слід розподілити за часовими періодами.

Найкраща часова прив'язка у виявленні і дослідженні лісових пожеж — це доба. Саме за добу надходять дані CGMS і розраховується ступінь пожежної небезпеки за умовами погоди. Геліостаціонарна орбіта супутників також прив'язана до земної доби. Відповідно, слід було забезпечити можливість виконання геоінформаційною системою запиту до масиву викидів тепла за календарною датою.

Для запитів потрібно було сформувати список унікальних дат, тобто список діб, в які зафіксовано теплові аномалії. Не можна брати просто список усіх діб, оскільки не на кожну дату зафіксовано хоча б один викид тепла. Незважаючи на те, що потенційно програма працюватиме, навіть за умови

створення порожнього файлу теплових аномалій, час виконання програми істотно збільшиться. Список унікальних дат містив 4342 позицій, тоді як за 20 років кількість діб становить 7300. Цей список формується пошуком унікальних значень комірки електронної таблиці. Потрібно або видалити дублікати за допомогою однойменної команди електронної таблиці, або використати інструмент «Розширений фільтр». Отриманий список відформатували за вимогами мови Python.

Для пошуку пожеж геопросторові дані потрібно було доопрацювати, а саме: дату і час зйомки викидів тепла перевести в місцевий (київський) час шляхом додавання до нього +2 годин, а також зміни дати, якщо час фіксації був пізніше 22:00. Це було виконано в електронній таблиці за допомогою автоформули.

Сам цикл пошуку пожеж досить складний. Детально його описано в наступному підрозділі. Для роботи використовувався комп'ютер (ноутбук) Asus N550 з операційною системою Windows 10 (номер ліцензії 00327-60000-00000-AA830, ключ BT79Q-G7N6G-PGBYW- 4YWX6-6F4BT).

Обчислення і редагування файлів даних виконувалися в електронній таблиці Libre Office 6.3, ліцензія якої MPL 2.0 дозволяє встановлювати пакет у бюджетних і комерційних організаціях.

Геопросторове оброблення даних виконано за допомогою QGIS.

2.9.2. Розроблення скрипту для автоматичного пошуку лісових пожеж

Більшість викидів тепла, які розміщені на залісненій території, як правило, ідентифікують контрольовані займання: вогнища, розведені для спалювання сміття, для обкурювання лісу чи сільськогосподарських угідь, або мають техногенне походження. Лісова пожежа, виявлена за допомогою засобів дистанційного зондування Землі, на карті виглядає як велика кількість викидів тепла, найчастіше високої потужності, зосереджених на невеликій площі. Групи викидів тепла, розміщені поряд, відповідають осередкам пожежі. Емпіричним шляхом встановлено, що відстань між сусідніми викидами тепла для їх класифікації як лісової пожежі має становити менш як 2,2 км. Більш детальну математичну викладку зі встановлення оптимального радіуса для пошуку та ідентифікації викидів тепла, які належать до одного осередку, наведено в розділі 4.

Скрипт для виявлення пожеж написано мовою arcpy (Python for ArcGIS). Сам скрипт працює в середовищі ArcGIS, однак його можна модифікувати для запуску в середовищі виконання Python 2.7 з підключенням модуля arcpy.

Принцип роботи скрипту для виявлення пожеж полягає у створенні серії запитів за списком дат, у які фіксувалися викиди тепла на досліджуваній території. В результаті виконання такого запиту ми отримуємо окремий

файл, який містить викиди тепла на кожну дату. Подальший процес подібний до алгоритму пошуку пожеж: виконується агрегування точок, тобто їх об'єднання в полігони, якщо точки розташовані поруч. Цим полігонам присвоюються атрибути пожеж. Потім всі знайдені полігони дописуються в кінцевий файл, який містить всі пожежі за певний період часу. Цей алгоритм більш детально викладено в підрозділі 2.5.

Складовими частинами скрипту виділення пожеж є такі.

1. Цикл «for» реалізує послідовне опрацювання всіх дат, коли було зафіксовано теплові аномалії, з пошуком і виділенням лісових пожеж.

2. Виділення теплових аномалій, зафіксованих на певну дату, реалізується виконанням запиту до бази даних (shape-файлу) з викидами тепла. Для цього використовується команда qpy.SelectLayerByAttribute_management, вхідним параметром якої, крім самого shape-файлу з тепловими аномаліями, є конкретна дата. Передача цієї дати зі списку унікальних дат відбувається за допомогою індексу циклу «for».

3. Виділені за запитом точки пожеж на одну дату можна зберегти як новий файл за допомогою команди qpy.CopyFeatures_management. У скрипті не передбачено збереження проміжних даних через їх надмірну кількість та відсутність практичної потреби в них, тому запис виділених викидів тепла здійснюється в один і той самий файл. Відповідно, в QGIS має бути дозволено перезапис файлів у діалоговому вікні Geoprocessing options (встановлений прапорець Overwrite the outputs of geoprocessing operations).

4. Перевіряємо виділені теплові аномалії на ймовірність пожежі. Суть полягає в тому, що лісові пожежі, зафіксовані супутником, виглядають як кілька теплових аномалій. Від одного викиду тепла пожежі не буде. Відповідно, підозрілими на пожежу є кілька точок тепла. Якщо за день зафіксовано від 1 до 5 викидів тепла, то це точно не лісова пожежа, а багаття. Тобто потрібно порахувати кількість збережених точок у файлі. Виконуємо команду qpy.GetCount_management(). За допомогою умовного оператора «if» порівнюємо отримане число із числом «5»: якщо більше, продовжуємо аналіз пожеж, якщо ні — починаємо цикл «for» спочатку.

5. Виконуємо агрегування точок, тобто об'єднання точок, які розміщуються поряд, у полігони — пожежі. Одна або дві точки не можуть утворити полігон. Лише три і більше викидів тепла утворюють полігони в результаті виконання команди qpy.AggregatePoints_cartography. Вона виконується над точками, записаними в окремий файл (на відповідну дату). В результаті виконання команди ми отримуємо шар (файл) з полігонами з вершинами в точках теплових аномалій, якщо ці полігони були утворені.

6. Перевіряємо наявність полігонів — лісових пожеж, знову застосовуючи функцію qpy.GetCount_management уже для файлу полігонів. Якщо виявлено хоча б одну пожежу (кількість об'єктів більше 0), продовжуємо роботу; дорівнює 0 — переходимо в початок циклу.

7. Під час агрегування полігонів їм не присвоюються атрибути з таблиці викидів тепла. Однак для бази пожеж бажано мати ці атрибути (дату, час пожежі, її потужність та інші параметри). Для приєднання параметрів до полігонів пожеж використовується геопросторова функція arcpy. SpatialJoin_analysis.

8. Наступний крок — створення карт на кожну пожежу. Цей процес виконується аналогічно візуалізації великих і потенційно небезпечних пожеж, яку описано в підрозділі 2.5. Тобто екстент і масштаб картографічного зображення, яке формується набором шарів шаблону карти, було змінено так, щоб у цей екстент повністю вміщався полігон пожежі. Після зміщення екстенту шаблону виконувалася візуалізація шарів, які також містили оновлені дані про пожежу. Результат візуалізації — растрове зображення — перейменовувалося так, щоб кожна космофотокарта мала назву на зразок «2020.04.16_ Zhytomyrska_8579.09МВт». Такі назви дозволяють впорядковувати файли за датою, відділяти пожежі в певній адміністративній області та бачити потужність пожежі ще до відкриття файлу.

Підпис кожної пожежі на картах складається з її загальної потужності (суми цього значення у викидах тепла), площі охопленої території, дати та часу фіксації, назви метеостанції, розташованої якнайближче (рис. 2.11). Також на картах підписано найбільші викиди тепла. Для спрощення орієнтування користувачів у правому нижньому куті космофотокарти подається карта-врізка з відображенням пожеж.

9. Після приєднання параметрів до полігонів виявлених пожеж і візуалізації карти на ці пожежі їх полігони потрібно дописати у файл. Команда arcpy.Append_management дописує наявні у файлі полігони до попередньо створеного файлу, в якому вже містяться раніше виявлені пожежі.

10. На цій команді скрипт можна було би закінчувати, однак під час роботи ArcGIS і QGIS зберігають в оперативній пам'яті всі новостворені файли (навіть перезаписані). Якщо ці файли не закрити, тривала робота з численними відкритими файлами приведе до аварійного завершення роботи програми внаслідок переповнення внутрішніх буферів. Відповідно, всі новостворені файли слід закривати. Це реалізується за допомогою вкладеного циклу команд. На початку створюємо ідентифікатор документа карти mxd = arc.mapping. MapDocument('CURRENT'). Далі виконуємо цикл для фрейму даних, який є складовою документа карти: for df in arcpy.mapping. ListDataFrames(mxd). Далі виконуємо такий самий цикл для шару фрейму даних документа карти for lyr in arcpy.mapping.ListLayers(mxd,«»,df). Оператор циклу «for» також створює змінну (df, mxd, lyr). Звичайно, ці змінні можна було б створити окремими командами. Далі видаляємо шари, створені під час одного циклу оператора «for». Якщо ім'я шару не дорівнює тим шарам, які слід залишити: if lyr. name.lower() != «02_heatsall_forestosm_sorted», тоді видаляємо ці шари командою arcpy.mapping.RemoveLayer(df, lyr).

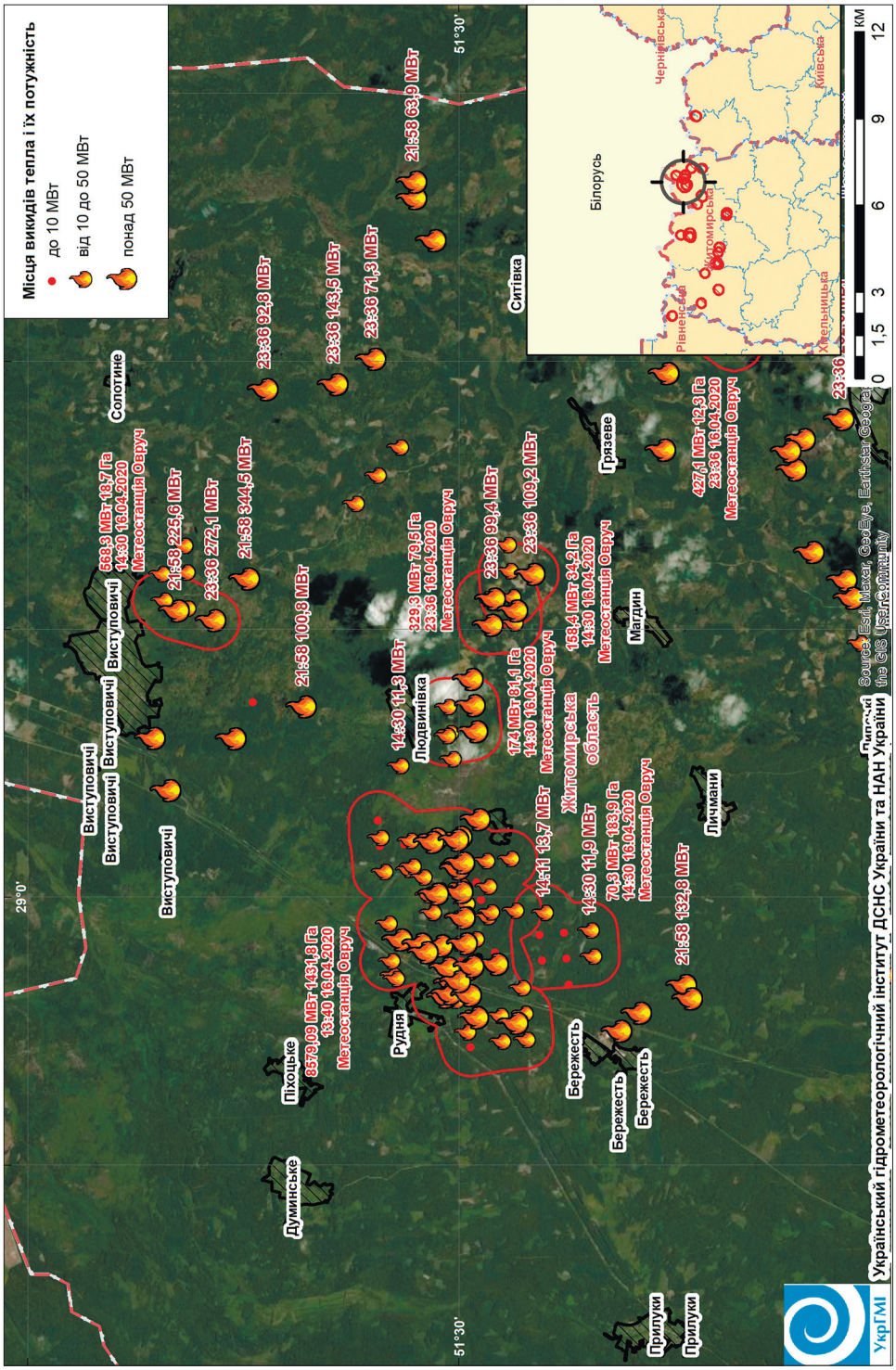


Рис. 2.11. Космофотокарта пожежі в Житомирській області у квітні 2020 року

Таблиця 2.9

Фрагмент бази даних пожеж

Широта	Довгота	Т, ⊠	Час	Дата	Супутник	Сенсор	Потужність	Площа	Область	Метеостанція	Висота, м
49,0379	32,3865	314,3	12:11	31.03.2001	Terra	MODIS	49,1	117,6	Черкаська	Чигирин	123
49,173	29,5631	324,9	12:20	04.08.2001	Terra	MODIS	173,6	119,6	Вінницька	Гайсин	210
48,474	28,9336	312,4	13:21	10.08.2001	Terra	MODIS	117,6	58,5	Вінницька	Гайсин	210
48,9929	32,0001	311,5	22:53	10.08.2001	Terra	MODIS	21,1	116,9	Черкаська	Сміла	126
49,3037	31,971	300,2	12:38	12.03.2002	Terra	MODIS	47,5	74,3	Черкаська	Черкаси	106
51,4674	28,2147	312,2	11:49	21.04.2002	Terra	MODIS	137,6	19,1	Житомирська	Овруч	168
51,2689	28,0992	300,6	23:12	22.06.2002	Terra	MODIS	22,7	160,7	Житомирська	Олевськ	182
51,517	28,3078	337,9	12:26	04.07.2002	Terra	MODIS	300,1	652	Житомирська	Овруч	168
51,2419	28,0984	328,1	12:26	04.07.2002	Terra	MODIS	90,2	186,8	Житомирська	Олевськ	182
51,4503	27,3196	325,4	12:26	04.07.2002	Terra	MODIS	135,1	127,8	Рівненська	Олевськ	182
51,4655	28,7953	340	14:09	04.07.2002	Aqua	MODIS	241,8	992,4	Житомирська	Овруч	168
51,5314	28,3642	324,3	14:09	04.07.2002	Aqua	MODIS	101,9	308,2	Житомирська	Овруч	168
51,5603	28,2785	314,7	21:59	04.07.2002	Terra	MODIS	241,5	547,4	Житомирська	Овруч	168
51,331	30,746	333,8	14:28	09.07.2002	Aqua	MODIS	164,8	264	Чернігівська	Остер	112
51,5059	28,5037	322,4	22:48	12.07.2002	Terra	MODIS	80,5	158,8	Житомирська	Овруч	168
51,5043	28,5213	301,5	2:52	13.07.2002	Aqua	MODIS	113,8	206,1	Житомирська	Овруч	168
51,5062	28,509	320	22:36	14.07.2002	Terra	MODIS	210,9	782,8	Житомирська	Овруч	168
51,5118	28,5103	308	23:19	15.07.2002	Terra	MODIS	119	236,7	Житомирська	Овруч	168
51,5011	28,4386	322,4	14:21	18.07.2002	Aqua	MODIS	360,2	1056,8	Житомирська	Овруч	168
51,8533	30,8466	324,6	13:26	19.07.2002	Aqua	MODIS	120,1	286,8	Чернігівська	Чернігів	113
51,8591	30,8513	349,5	14:09	20.07.2002	Aqua	MODIS	387,3	463	Чернігівська	Чернігів	113
51,861	30,84	322,4	22:42	21.07.2002	Terra	MODIS	377,1	664,2	Чернігівська	Чернігів	113
51,8591	30,8477	313,7	2:46	22.07.2002	Aqua	MODIS	107,6	314,7	Чернігівська	Чернігів	113
51,8903	30,8692	304,3	3:29	23.07.2002	Aqua	MODIS	95,8	515	Чернігівська	Чернігів	113
51,2944	28,1074	326,6	11:37	28.07.2002	Terra	MODIS	142,1	159,4	Житомирська	Олевськ	182

Програмний код може обробляти за один раз близько 50 000 викидів тепла. Потім рекомендується перезапустити скрипт. Тіло скрипту для визначення лісових пожеж за викидами тепла, отриманими в результаті супутникового сканування, має такий вигляд:

```
for x in range(ShpRowsQuant_digit):
... arcpy.SelectLayerByAttribute_management(«02_HeatsAll_ForestOSM_
sorted», «NEW_SELECTION», QueryDatesList[x])
... arcpy.CopyFeatures_management(«02_HeatsAll_ForestOSM_sorted», 
‘F:\METEODATA\FIRES3\TempData\ \Query.shp’)
... arcpy.AggregatePoints_cartography(«Query»,’F:\METEODATA\FIRES3\
TempData\\Aggr.shp’, ‘2200 Meters’)
... arcpy.SpatialJoin_analysis(‘Aggr”,”Query”,F:\METEODATA\FIRES3\
TempData\\Join.shp’)
... arcpy.Append_management(‘Join’,»F:\METEODATA\FIRES3\
OutDateHeatsShpFiles4\ FileToAppend.shp»)
... mxd = arcpy.mapping.MapDocument(‘CURRENT’)
... for df in arcpy.mapping.ListDataFrames(mxd):
... for lyr in arcpy.mapping.ListLayers(mxd, «», df):
... if lyr.name.lower() != «02_heatsall_forestosm_sorted»:
... arcpy.mapping.RemoveLayer(df, lyr)
```

Після запуску скрипту виявилося, що його робота потребує значно більше часу, ніж очікувалося. Оброблення одного дня спостережень тривало близько 30 с. Причина полягала в тому, що в циклі виконувалися всі команди, незалежно від результатів їх роботи. Наприклад, не на кожну дату наявні кілька викидів тепла (понад 5). Це число було вибрано аналітично, допустимі значення від 3 до 10 (2 точки не можуть утворити полігон). Якщо викидів тепла за певне число менше 5, подальші команди можна не виконувати — агрегація точок у полігони не буде результативною (пожежі не буде виявлено). Також результат агрегації буває різним: полігон може бути утворено або не утворено, залежно від розміщення викидів тепла. Якщо теплові аномалії розкидані по території України, то полігонів не буде утворено. Відповідно, команди присвоєння атрибутів полігонам пожеж і запису останніх до файлу можна не виконувати. Для реалізації цього було використано умовні оператори «if». Однак слід зауважити, що виконання останніх операторів також потребує часу. Після оптимізації скрипт виглядав так:

```
for i in range(len(QueryDatesList)):
... arcpy.SelectLayerByAttribute_management (“02_HeatsAll_ForestOSM_
sorted”, “NEW_SELECTION”, QueryDatesList[i])
... arcpy.CopyFeatures_management(“02_HeatsAll_ForestOSM_sorted”, 
‘F:\\METEODATA\\FIRES3\\TempData\\Query.shp’)
... ShpRowsQuant = arcpy.GetCount_management(“Query”)
```

```
... ShpRowsQuant_digit = int(ShpRowsQuant[0])
... if ShpRowsQuant_digit > 5:
... arcpy.AggregatePoints_cartography("Query",F:\METEODATA\ FIRES3\
TempData\\Aggr.shp",2200 Meters')
... ShpRowsQuant = arcpy.GetCount_management("Aggr")
... ShpRowsQuant_digit = int(ShpRowsQuant[0])
... if ShpRowsQuant_digit > 0:
... arcpy.SpatialJoin_analysis('Aggr","Query",F:\METEODATA\FIRES3\
TempData\Join.shp')
... arcpy.Append_management('Join","F:\METEODATA\FIRES3\
OutDateHeatsShpFiles4\ FileToAppend.shp")
... mxd = arcpy.mapping.MapDocument('CURRENT')
... for df in arcpy.mapping.ListDataFrames(mxd):
... for lyr in arcpy.mapping.ListLayers(mxd, "", df):
... if lyr.name.lower() != "02_heatsall_forestosm_sorted":
... arcpy.mapping.RemoveLayer(df, lyr)
```

Розрахунки за кінцевою версією скрипту зайняли понад 10 годин. Створена база даних представлена shp-файлом, в якому містяться полігони, що займала пожежа і їх атрибути, а також файлом електронної таблиці у форматі xlsx, в якому є лише атрибути (табл. 2.9).

2.9.3. Постоброблення бази даних лісових пожеж

Оскільки базу даних пожеж планувалося використати для порівняння з базою, переданою Держлісагентством, то під час її формування ідентифікувалися навіть невеликі за площею групи викидів тепла. Якщо пожежа тривала більш як один день, її представлено кількома записами в таблиці і кількома полігонами, що дозволяло відстежувати динаміку лісової пожежі. До великих пожеж можна віднести пожежі, які мають значну площу (понад 1 км^2) і кількість осередків понад 10. Відповідно, пожеж, а точніше їхніх осередків, у базі записано більш як 5000. Однак кількість карт значно менша, оскільки на кожну групу осередків, які ймовірно були однією пожежею, створювалася одна карта. Крім потужності, ці два параметри (кількість осередків і площа, охоплена пожежею) дозволяють оцінити її інтенсивність та масштабність.

Для забезпечення кореляції з базою даних від Держлісагентства виконано геокодування, яке полягало в присвоєнні пожежам назв населених пунктів, поблизу яких вони відбувалися. Цей процес реалізовано приєднанням до файлу з полігонами пожеж атрибутивної інформації від полігонів населених пунктів за такої умови: до полігону пожежі приєднувалися атрибути найближчого населеного пункту.

Оскільки в метеорологічній галузі всі вимірювання, зокрема дані про пожежну небезпеку, прив'язані до метеостанцій, фахівцями УкрГМІ було

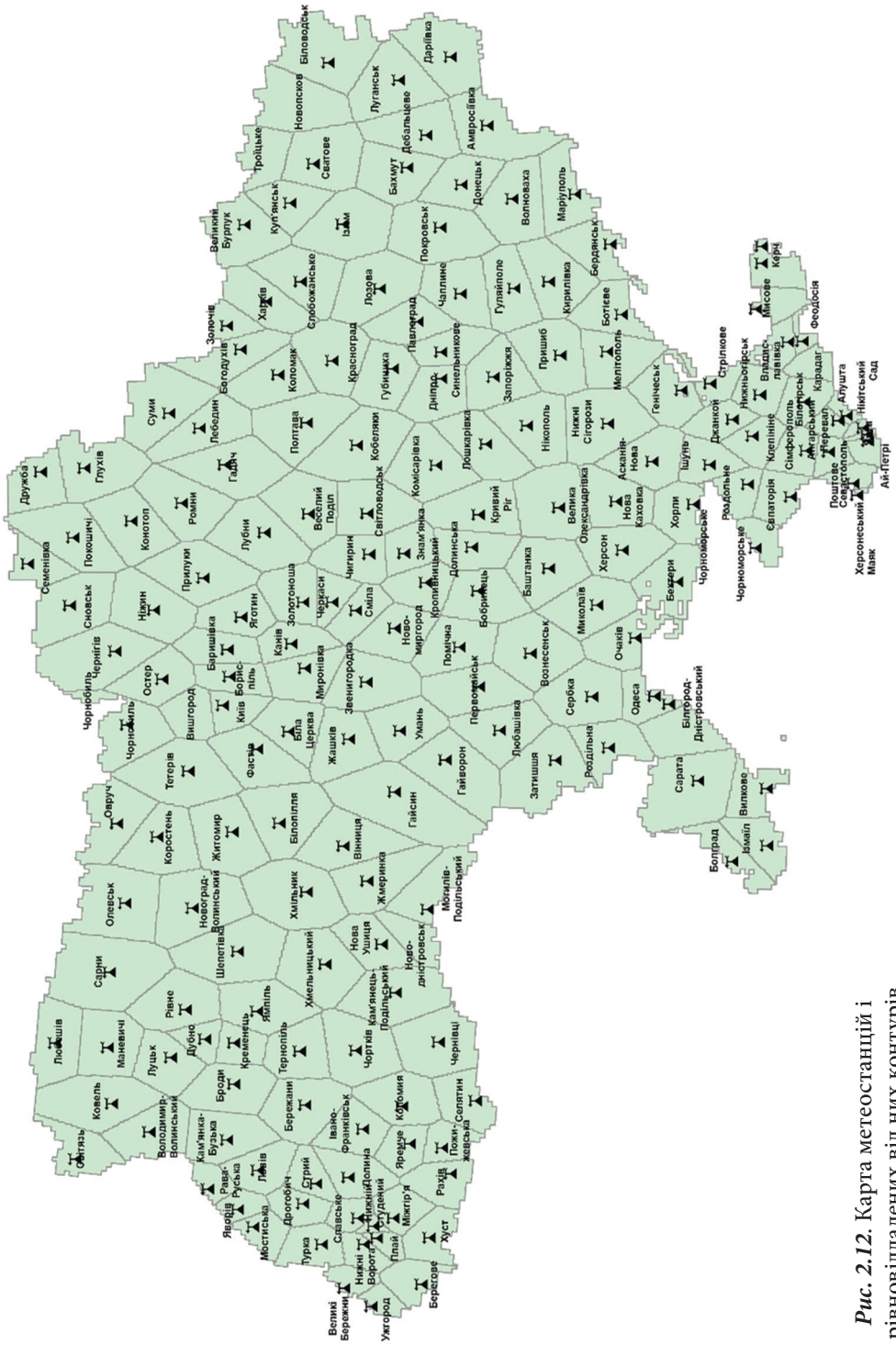


Рис. 2.12. Карта метеостанцій і рівновіддалених від них контурів

рекомендовано виконати геокодування і прив'язати виявлені пожежі до наявних на той час метеостанцій.

Для виконання цього завдання було створено карту геокодування, контури полігонів якої рівновіддалені від метеостанцій (рис. 2.12). Кожній знайденій пожежі було присвоєно назву метеостанції, на полігоні якої вона розміщувалася.

База даних лісових пожеж має частину полів, успадкованих від таблиці викидів тепла. Це «latitude», «longitude», «bright_ ti4», «scan», «track», «acq_date», «acq_time», «satellite», «instrument», «confidence», «version» і «bright_ti5», значення яких описано в підрозділі 2.4. Поле «type» замінено на «daynight». Нові поля бази даних такі:

- «ua_time» — час фіксації пожежі, за українським місцевим часом;
- «ua_date» і «date_ua» — дата фіксації пожежі у форматах «дд. мм.рррр» і «рррр.мм.дд», наприклад 31.03.2001 і 2001.03.31;
- «ForestPow» — потужність лісової пожежі на час знімання;
- «Area» — площа лісової пожежі на час знімання, вирахувана шляхом підрахунком площі полігону з крайніх точок викидів тепла пожежі;
- «UKRNAME» і «ENGNAME» — українська і англійська назви області, в якій зафіксовано пожежу;
- «Name_Ukr», «SHORT_» і «NAME_FULL_» — українська, скорочена і англійська назва метеостанцій, найближче до яких зафіксовано пожежу;
- «HEIGHT_M» — висота відповідної метеостанції.

2.10. Порівняння виявлених пожеж зі статистикою авіаційної охорони лісів Держлісагентства України

Для оцінки точності роботи картографічно-аналітичної Системи моніторингу викидів тепла та виявлення потенційно-небезпечних пожеж було виконано її перевірку шляхом зіставлення переліку знайдених лісових пожеж і Української державної бази авіаційної охорони лісів Держлісагентства України. Остання база містить всі пожежі, зафіксовані авіаційною охороною лісів, з часовою деталізацією до 1 доби і просторовою деталізацією до обласного лісництва (адміністративної області). Сама база даних складається з набору електронних таблиць, кожна з яких називається «Щоденна інформація про лісові пожежі» і містить дані про зафіксовані і погашені пожежі на території одного з обласних лісництв (рис. 2.13).

Порівняння мало бути виконано шляхом приведення всіх таблиць бази даних до уніфікованого вигляду (1-й і 2-й етапи), приєднання їх до даних, знайдених Системою моніторингу, і створення спільної таблиці (3-й етап). Власне порівняння мало бути здійснене на 4-му етапі зіставленням даних у рядках. Пожежі, яка була зафіксована Держлісагентством, мало відповідати займання, виявлене Системою моніторингу.

ЩОДЕННА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ЛІСОВІ ПОЖЕЖІ № 56

форма №1

станом на **30.04.2020.**

№ n/n	Рескомліс АР Крим, облуправління, підприємства, організації	Виникло пожеж 30.04.2020.		Погашено пожеж 30.04.2020.			З початку року Держлісагентство			Погашено пожеж за участю ДСНС	Задіяно на пожежах								
											чоловік			техніки					
		кіль-кість	площа, га	кіль-кість	площа, га		кіль-кість	площа, га						Держлісагентства		ДСНС		інші	
					всього	в т.ч. верх.		всього	в т.ч. верх.		ДАЛРУ	ДСНС	інші	пож. маш.	інша техніка	пож. маш.	інша техніка	пож. маш.	інша техніка
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	Рескомліс АР Крим						0	0	0										
2	Вінницьке						0	0	0										
3	Волинське						89	89,3	0										
4	Дніпропетровське						39	15,34	0										
5	Донецьке	1	0,01	1	0,01		21	8,7	0		4			1	1				
6	Житомирське	10	2,2	2	3,8		410	32073,62	5481,3		17			3	3				
7	Запорізьке						14	13,96	0										
8	Київське	1	0,15	1	0,2		115	38,7	0		10			2	2				
9	Кіровоградське						3	1,35	0										
10	Луганське	2	0,52	1	0,02		67	116,72	15,45		3			1					
11	Львівське						17	52,6	0										
12	Миколаївське						19	2,64	0										
13	Одеське						45	75,8	9,6										
14	Полтавське				12,7	0,8	55	81,27	0,8										
15	Рівненське	3	8,5	3	8,5		59	108,5	6,5		26			5	4				
16	Сумське						29	15,12	0,1										
17	Тернопільське						2	5	0										
18	Харківське	1	0,2	1	0,3		52	56,1	0		10			2	1				
19	Херсонське	1	0,01	1	0,02		77	24,63	0,01	1	5	3		1		1			
20	Хмельницьке	2	0,9	2	1,1		34	18,86	0	1	15	5		3	1	1			
21	Черкаське	1	0,02	1	0,1		42	9,91	0		10			2	1				
22	Чернігівське			1	23,7		41	141,43	0	1	10	6		1	2	2			
23	Закарпатське						63	100,24	1,7										
24	Ів.-Франківське						1	2	0										
25	Чернівецьке						0	0	0										
26	УкрНДІЛГА						14	12,31	0										
27	Севастопольське ДЛМГ						0	0	0										
28	УкрНДІгірліс						0	0	0										
29	Шацький НПП						0	0	0										
30	.....																		
	Всього	**22**	**12,51**	**14**	**50,45**	**0,8**	**1308**	**33064,1**	**5515,46**	**3**	**110**	**14**	**0**	**21**	**15**	**4**	**0**	**0**	**0**

Рис. 2.13. Простановка дати фіксації пожежі в Українській державній базі авіаційної охорони лісів

Уніфікація баз даних передбачала приведення їх до такого вигляду, щоб наявні в них відомості можна було б зіставити одне з одним. Одному запису в базі даних мають відповідати одна календарна дата і одна адміністративна область. Запис може містити відомості про одну пожежу або сумарні відомості про кілька пожеж: кількість, потужність і охоплена площа. Решта характеристик (географічні координати, час фіксації, температура) не підсумовуються і не осереднюються, а визначаються з першої пожежі у їх групі. Останні характеристики потрібні для індивідуалізації пожеж з метою зіставлення ідентичних із них.

1. *Уніфікація бази авіаційної охорони лісів.* Ця база складається зі схожих форм (таблиць), кожна з яких заповнена на певну дату. В кожній формі є список усіх обласних управлінь, яким відповідають сумарні характеристики пожеж, виявлених на цю дату в цьому лісництві. Для уніфікації цієї бази даних навпроти кожного обласного управління має бути проставлена дата фіксації пожеж. Обов'язковий формат дати: «рік.місяць.день», наприклад 2020.04.30. Це пов'язано з можливою потребою упорядкування бази за датою як одним із параметрів. У кінцевому вигляді база авіаційної охорони лісів має містити один рядок для заголовків і лише ті рядки з датами і обласними управліннями, для яких виявлено пожежі. Решта рядків із значеннями: «погашено пожеж», «з початку року», «задіяно на пожежах» відкидаються, тобто не переходять в уніфіковану базу даних.

Під час уніфікації бази авіаційної охорони лісів було виявлено низку проблем, які уповільнили роботу. Календарна дата фіксації пожеж розміщувалася в різних комірках електронної таблиці, що унеможливило автоматизацію простановки дат. Тому дати навпроти обласних управлінь довелося проставляти вручну для кожної форми (перша дата, решта дат копіювала першу). Якби форми були ідентичними, цю операцію можна би було виконати для місяця загалом, що скоротило б кількість операцій у 30 разів. Також траплялися порожні форми всередині місяців, які не містили ніяких відомостей, у тому числі дат, які потрібно було видаляти вручну.

Крім того, Українська державна база авіаційної охорони лісів фіксує пожежі не лише в обласних управліннях, а й в окремих господарствах. Деякі з них, наприклад Державне підприємство «Севастопольське досвідне лісомисливське господарство» не входять до відповідної адміністративної одиниці. Це також Тетерівський ДВДЛГ і Шацький НПП. Кількість записів у базі даних для кожного з таких підприємств відповідає кількості днів за 2000—2020 роки і становить понад 7000. Тому ці дані також було враховано. Підрахунок сумарних характеристик пожеж виконували автозаповненням формул. Проте, оскільки структура Держлісагентства змінювалася з часом, відповідно доводилося коригувати формули підрахунку сумарних характеристик пожеж. Деякі підприємства (УкрНДІгірліс і УкрНДІЛГА) мають лісові території, розосереджені в кількох адміністративних областях. Їх не

можна було включити до певної області, тому ці дані довелося відкинути і не враховувати в дослідженні.

Крім зазначених недоліків, вихідні дані містили технічні помилки, наприклад пробіл у назві обласного управління «Чернівецьке » призвів до втрати понад години робочого часу, оскільки програма не видаляла дублікати записів за назвою (з точки зору програми «Чернівецьке » і «Чернівецьке» — це різні назви). Також у базі не було даних за 2016 рік.

У результаті було отримано базу даних лісових пожеж на всі дати і всі адміністративні області України (рис. 2.14), яка містила 40 тис. записів із пожежами. Всього було опрацьовано 115 тис. записів.

2. *Уніфікація бази пожеж за супутниковими даними.* Оскільки база авіаційної охорони лісів деталізована лише до рівня лісництв (областей), дані супутникових пожеж для сумісності також узагальнили до рівня областей. Реалізували це впорядкуванням масиву даних спочатку за областю, а потім за датою і підрахунком сумарних характеристик (кількість пожеж і площ та ін.), які відповідають одній області і одній даті (рис. 2.15).

Унікальні області з унікальними датами було сформовано також видаленням дублікатів. Кожна з цих областей містила значення або однієї пожежі, або їх суми. Підрахунок сум здійснювали вручну, оскільки щоразу сумувалася різна кількість записів. В одній області за день найчастіше виявлялася одна пожежа, але їх могло бути від 2 до 21. Усього було знайдено 1866 днів з пожежами в окремих областях.

3. *Утворення спільної бази даних лісових пожеж.* Отримані дві різні бази слід було об'єднати так, щоб на кожну дату були відомості або з одної бази, або з обох. Порожніх дат не мало бути. Реалізували це ручним опрацюванням, без використання функцій баз даних, доступних лише в платних версіях програм-

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V
1			№ п/п	Рескомпіс АР Крим, облуправління, підприємства, організації	Виникло пожеж		Погашено пожеж			З початку року			Погашено пожеж за участю ДСНС	Задіяно на пожежах								
2										Держлісагентство				чоловік			техніки					
3	Дата	Дата			кіль-кість	площа, га	кіль-кість	площа, га		кіль-кість	площа, га			ДАЛРУ	ДСНС	інші	Держлісагентства		ДСНС		інші	
4								всього	в т.ч. верх.		всього	в т.ч. верх.					пож. маш.	інша техніка	пож. маш.	інша техніка	пож. маш.	інша техніка
5	30.04.2020.	2020.04.30	5	Донецьке	1	0,01	1	0,01		410	32073,62	5491,3		17			3	3				
6	30.04.2020.	2020.04.30	6	Житомирське	10	2,2	2	3,8		59	108,5	6,5		26			5	4				
7	30.04.2020.	2020.04.30	8	Київське	1	0,15	1	0,2		67	116,72	15,45		3			1					
8	30.04.2020.	2020.04.30	10	Луганське	2	0,52	1	0,02		34	18,86	0	1	15	5		3	1	1			
9	30.04.2020.	2020.04.30	15	Рівненське	3	8,5	3	8,5		21	8,7	0		4			1	1				
10	30.04.2020.	2020.04.30	18	Харківське	1	0,2	1	0,3		115	38,7	0		10			2	2				
11	30.04.2020.	2020.04.30	19	Херсонське	1	0,01	1	0,02		52	56,1	0		10			2	1				
12	30.04.2020.	2020.04.30	20	Хмельницьке	2	0,9	2	1,1		77	24,63	0,01	1	5	3		1		1			
13	30.04.2020.	2020.04.30	21	Черкаське	1	0,02	1	0,1		42	9,91	0		10			2	1				
14																						

Рис. 2.14. Завершений вигляд уніфікованої бази авіаційної охорони лісів

	A	F	G	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
1	UKRNAME	HEIGHT_M	date_ua	ForestPow	Area	latitude	longitude	bright_ti4	scan	track	satellite	instrumer	confidenc	version	bright_ti5	daynight
3225	Чернігівська	112	2019.09.13	17,76	119,5	51,09011	30,73503	355,79	0,32	0,55	N	VIIRS	0	1	295,87	D
3226	Чернігівська	127	2019.09.18	25,42	72,9	51,39095	32,45495	336,25	0,4	0,44	N	VIIRS	0	1	292,73	D
3227	Чернігівська	113	2019.10.02	41,03	34,6	52,0075	31,147	323,4	1	1	Terra	MODIS	82	6,03	289,3	D
3228	Чернігівська	193	2019.10.08	18,72	15,3	51,63542	32,82913	333,28	0,39	0,37	N	VIIRS	0	1	281,42	D
3232	Чернігівська	127	2019.10.15	84,58	116,5	51,46567	32,11737	339,43	0,48	0,48	N	VIIRS	0	1	294,8	D
3233	Чернігівська	124	2019.10.16	25,95	13	51,26756	31,76111	347,08	0,38	0,59	N	VIIRS	0	1	291,48	D
3234	Чернігівська	132	2019.10.17	456,57	470,4	50,5686	32,7127	324,4	3,9	1,8	Terra	MODIS	83	6,03	293,3	D
3235	Чернігівська	113	2019.11.02	43,81	94,1	51,84218	31,17306	334,04	0,44	0,39	N	VIIRS	0	1	281,51	D
3238	Чернігівська	112	2019.11.12	47,16	105	51,30336	30,85313	325,22	0,54	0,42	N	VIIRS	0	1	271,45	D
3239	Чернігівська	112	2019.11.14	31,08	58,9	51,3285	30,715	301,9	1,2	1,1	Aqua	MODIS	49	6,03	280,1	D
3240	Чернігівська	132	2020.03.18	53,71	23,1	50,63316	32,36116	330,76	0,32	0,55	N	VIIRS	0	1	285,38	D
3241	Чернігівська	193	2020.03.19	29,54	30,9	51,93515	33,21759	336,74	0,36	0,58	N	VIIRS	0	1	285,77	D
3242	Чернігівська	124	2020.03.22	141,15	70,3	50,9313	32,1928	303,6	1,7	1,3	Aqua	MODIS	56	6,03	281	D
3243	Чернігівська	132	2020.03.24	77,02	113,6	50,46911	32,5245	337	0,41	0,37	1	VIIRS	0	0	282,2	D
3247	Чернігівська	123	2020.03.26	157,43	212,3	51,40913	30,63236	326,7	0,55	0,51	1	VIIRS	0	0	284,5	D
3255	Чернігівська	127	2020.03.28	342,16	921	51,59451	32,32569	309,1	0,35	0,57	1	VIIRS	0	0	262,8	N
3258	Чернігівська	113	2020.03.29	185,24	324,7	51,8369	31,1685	312,6	1,6	1,2	Terra	MODIS	73	6,03	294,8	D
3259	Чернігівська	112	2020.03.30	261,77	175,4	50,8086	31,2575	378,5	1,3	1,1	Aqua	MODIS	100	6,03	293,7	D
3260	Чернігівська	112	2020.04.05	39,36	76,7	51,0883	30,8146	307,5	2	1,4	Aqua	MODIS	64	6,03	289	D
3261	Чернігівська	132	2020.04.06	165,29	67,5	50,52824	32,67622	367	0,37	0,58	N	VIIRS	0	1	274,43	N
3265	Чернігівська	113	2020.04.08	607,55	729,8	51,88733	31,01318	330,5	0,39	0,36	1	VIIRS	0	0	296,2	D
3266	Чернігівська	113	2020.04.08	98,52	122,3	51,88733	31,01318	330,5	0,39	0,36	1	VIIRS	0	0	296,2	D
3267	Чернігівська	112	2020.04.09	48,07	458,3	51,15754	30,79059	329,9	0,44	0,38	1	VIIRS	0	0	296,7	D
3268	Чернігівська	193	2020.04.13	119,38	17,1	51,5791	33,0933	345,9	1	1	Aqua	MODIS	94	6,03	299,3	D
3269	Чернігівська	193	2020.04.13	26,78	43,1	51,44785	32,82211	367	0,47	0,64	N	VIIRS	0	1	292,16	D
3270	Чернігівська	127	2020.04.13	75,23	212,4	51,5893	32,3584	315,1	1	1	Terra	MODIS	69	6,03	297,7	D
3273	Чернігівська	113	2020.04.29	1034,3	484,9	51,8401	31,1897	403,7	1,3	1,1	Terra	MODIS	100	6,03	296,8	N
3274	Чернігівська	113	2020.04.30	25,47	157,4	51,84192	31,17423	295,4	0,44	0,63	1	VIIRS	0	0	276,9	N
3275	Чернігівська	113	2020.06.10	140,4	135,5	51,993	31,21228	331,1	0,5	0,41	1	VIIRS	0	0	301,5	D
3276	Чернігівська	127	2020.08.26	14,9	21,9	51,81666	31,51215	341,1	0,45	0,39	1	VIIRS	0	0	293	D
3277	Чернігівська	160	2020.10.10	33,9	10,1	52,18253	32,8596	331	0,39	0,36	N	VIIRS	0	0	284,3	D
3278	Чернігівська	113	2020.10.11	27,7	10,9	51,93617	31,28903	330,2	0,45	0,39	1	VIIRS	0	0	288,1	D
3279	Чернігівська	127	2020.10.26	15	21,6	52,00342	32,25124	329,4	0,48	0,48	1	VIIRS	0	0	283	D
3280	Чернігівська	160	2020.11.07	55,4	75,5	52,12045	32,92698	331,4	0,45	0,39	1	VIIRS	0	0	285,4	D
3281																

Рис. 2.15. Завершений вигляд уніфікованої бази пожеж за супутниковими даними

ного забезпечення. Спочатку було створено неперервний діапазон календарних дат [2000.11.01 … 2020.07.01], усього 7656 записів. Далі цей діапазон дублювався 25 разів (відповідно до кількості областей), усього отримано 191 401 записів. Кожна група записів (25 груп по 7656 записів) отримала назву відповідної області. Дані з уніфікованих баз почергово вставлялися в діапазон дат, сортувалися за зростанням і видалялися дублікати — порожні записи. Таким чином унікальними ставали записи з датою і областю, а кількість записів для двох баз даних — однаковою, як і порядок їх слідування в базі. Ці бази можна було об'єднати шляхом копіювання-вставки. Контроль здійснювали за допомогою вибіркової перевірки збігу дати-області між діапазоном календарних дат і базами даних. Поле «дата-область» входило тричі в кінцеву базу даних, всі операції з нею контролювалися по цим полям. Порожні записи було видалено.

4. *Виконання порівняння.* Кінцева база даних пожеж містила додаткові поля, які визначають наявність пожеж з одного або двох джерел. Порівняння планувалося виконати обчисленням різниці між однотипними значеннями. Також передбачалася статистична обробка для оцінки точності: обчислення середньоквадратичного відхилення збігу днів з пожежами, кількості зафіксованих пожеж і сум площ, за потреби можна було визначити коефіцієнти між числовими даними з різних баз даних.

Однак практично відразу було виявлено, що кількість пожеж, зафіксованих авіаційною охороною лісів, приблизно в 30 разів більша за кількість пожеж, виявлених супутниковими методами. Відповідно, розраховувати коефіцієнт кореляції між кількістю та іншими показниками пожеж з різних джерел сенсу не було.

Для оцінки отриманих результатів було введено такий показник, як підтверджуваність пожеж. Підтверджуваність — це збіг календарної дати і області для виявлених пожеж одними методами з відповідними датою і областю для пожеж, зафіксованих іншими методами. Наприклад, якщо 23 травня у Волинській області наявність пожежі було зафіксовано і лісниками, і за допомогою супутникових даних, це означає, що є підтверджуваність. Якщо дата або область не збіглися, підтверджуваності немає. Відсутність пожеж також можна вважати підтвердженням.

Кількість пожеж, виявлених супутниковими методами і одночасно підтверджених авіаційною охороною лісів, становить 60,86 %. Підтверджуваність для великих пожеж (понад 1 ГВт викидів тепла) — 90,36 %, для середніх (від 100 МВт до 1 ГВт) — 67,73%, для малих (до 100 МВт) — 54,9%.

Отже, кількість пожеж, виявлених супутниковими методами, особливо невеликих займань, виявилася значно меншою порівняно із зафіксованими у базі авіаційної охорони лісів. Головною причиною неповного виявлення пожеж Системою супутникового моніторингу стала недосконаліть методики дослідження. Система здійснює пошук потенційно небезпечних по-

жеж, тобто пожеж з інтенсивністю горіння понад 10 МВт, що відповідає горінню на площі приблизно 100 м^2, тоді як структури Держлісагентства фіксують всі, навіть малоінтенсивні пожежі. Тому для вдосконалення системи моніторингу окремі викиди тепла, які відкидалися, слід було б вважати пожежами, так само, як і малоінтенсивні групи викидів тепла. Крім того, потрібно переглянути критерії групування викидів тепла в одну пожежу — відстань між викидами тепла має бути меншою за 5 тис. м., орієнтовно 1—2 тис. м. Серед інших причин можна назвати такі.

1. Вузьке часове вікно сканування території супутниками — 4 супутники лише 8 разів на добу покривають всю територію України; кожен супутник сканує смугу території короткий час (менш як 1 хв), відповідно пожежа, яку загасили до сканування або яка виникла після сканування, не відображається на сенсорах. Вирішенням цієї проблеми може бути розміщення супутників з термосенсорами на геостаціонарній орбіті, що дозволить проводити сканування території кілька разів на годину. Так, наприклад, працює японський супутник Himawari 8.

2) Хмарний покрив розсіює теплове випромінювання і перешкоджає ідентифікації пожеж, тобто пожежі, які сталися у хмарні дні Система моніторингу не зафіксувала.

3) Супутниковий моніторинг пожеж постійно вдосконалювався впродовж періоду спостережень. Сьогодні працюють 4 супутники, однак Terra був запущений 1999 року і його обладнання на сьогодні певною мірою вже застаріле; Aqua — 2002 року, Suomi NPP — 2011 року, NOAA-20 — 2017 року. Найбільш досконалим є супутник NOAA-20, який і фіксує найбільшу кількість теплових викидів. Тому до 2017 року (особливо до 2011 року) виявлялися лише великі викиди тепла (переважно понад 1 МВт). Для порівняння: у 2001 році було виявлено 4 пожежі, у 2002 році — 96, у 2003 році — 19, у 2019 році — 292, а в 2020 році— 873 пожежі. Водночас методика роботи Держлісагентства, яка полягає у візуальній ідентифікації пожеж під час обходу території, практично не змінилася за цей період.

4) Пожежі з малою інтенсивністю горіння, тління, невеликі пожежі в лісовій підстилці супутники можуть взагалі не ідентифікувати через їх відносно невисоку чутливість. Тому й кількість зафіксованих супутниками пожеж є меншою порівняно з візуальним оглядом.

5) Зменшення площі лісів. Для дослідження було взято залісену територію станом на 2019 рік, тоді як у 2001 році вона була істотно більшою. Відповідно, не всі викиди тепла було враховано та ідентифіковано як лісові пожежі. Крім того, Держлісгосп гасить пожежі, які відбуваються на прилеглій до лісу території, а ці дані не розглядалися під час порівняння. Тому варто було б враховувати викиди тепла і навколо буферної зони лісу.

2.11. Механізми підвищення точності пошуку потенційно небезпечних пожеж

Робота системи моніторингу полягає в отриманні і опрацюванні інформації про зафіксовані теплові аномалії на території України. На точність пошуку потенційно небезпечних пожеж впливають як повнота, точність і оперативність надходження даних, так і якість роботи модулів опрацювання й пошуку пожеж. Вище вже йшлося про недоліки, виявлені під час тестування Системи моніторингу, тепер визначимо шляхи підвищення точності пошуку потенційно небезпечних пожеж.

Першим механізмом підвищення точності пошуку є контроль повноти отримуваних вихідних даних про виявлені теплові аномалії. На сьогодні дані про викиди тепла, виявлені супутниками NASA, є відкритими і безкоштовними. Вони охоплюють територію практично всієї земної кулі, за винятком невеликих зон в екваторіальних і субекваторіальних широтах. Робота з таким великий обсягом даних передбачає застосування певних технічних компромісів. Один із них — надсилання користувачам системи неповних даних. Емпіричним шляхом виявлено, що реєстрація з різних ір-адрес і різних адрес електронної пошти приводить до одержання дещо різних даних про пожежі. Не можна стверджувати однозначно, але реєстрація в заявці на отримання даних з офіційної адреси установи зменшую повноту отримуваних даних порівняно з реєстрацією з особистої пошти локалізованого сервера, на зразок @ukr.net. Імовірно це пов'язано з бажанням розробників знизити навантаження на сервер NASA і отримати додаткові кошти від організацій-користувачів, оскільки вони частіше використовують дані про викиди тепла з комерційною метою на відміну від приватних користувачів, які здебільшого застосовують їх у пізнавальних, наукових або освітніх цілях. Отже, таке джерело отримання даних, як підписка на сервері NASA має дублюватися, отримувані дані порівнюватися і в разі виявлення розходжень —доповнюватися.

Другий механізм пов'язаний з поліпшенням оперативності надходжень вихідних даних про теплові аномалії. На сьогодні час затримки з моменту фіксації теплових аномалій супутниками до надходження даних на сервер Системи моніторингу становить 2—3 години. Водночас Державне космічне агентство України отримує таку інформацію від NASA швидше, орієнтовно через 30—40 хв. Крім того, два незалежних канали отримання даних підвищують надійність роботи системи моніторингу.

Третій механізм стосується отримання даних з інших супутників. Крім супутників NASA, термосканери на борту мають супутники серії Sentinel Європейського космічного агентства, однак вони передають дані в необробленому вигляді. Тобто дані про викиди тепла передаються не як точки з координатами і атрибутивною інформацією, а як растрове зображення, в

якому «світлота» пікселів відповідає зафіксованій температурі. Крім того, пікселі не мають координатної прив'язки, лише часову. Робота з такими зображеннями передбачає оброблення великих масивів даних, що полягає у «координатному розгортанні» масиву, його фільтрації, виділенні викидів тепла та їх геокодуванні. Це потребує наявності набагато більш потужного обладнання та окремого виділеного сервера.

Отже, розширення переліку джерел надходжень даних про теплові аномалії, завантаження даних напряму з супутників і підвищення оперативності їх надходження дозволять істотно поліпшити точність роботи програмного комплексу, описаного у цій монографії.

Розділ 3

ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИЙ РОЗПОДІЛ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН НАД ТЕРИТОРІЄЮ УКРАЇНИ ЗА ДАНИМИ СУПУТНИКОВИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Супутникове зондування забруднюючих речовин є досить складним завданням порівняно з визначенням характеристик підстильної поверхні чи хмарним покривом. Якщо просторова роздільна здатність супутників, які зондують підстильну поверхню, досягає вже метрів і навіть десятків сантиметрів, то у випадку забруднюючих речовин у газоподібному стані йдеться поки що про кілометри. Ще десять років тому просторова роздільна здатність супутників для зондування газових компонент перевищувала 10 км. Наприклад, просторова роздільна здатність приладу The SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CartograpHY (SCIAMACHY)[1] на борту супутника Envisat перевищує 30 км, а The Ozone Monitoring Instrument (OMI)[2] на борту супутника Aura — 13 км. Революція у сфері зондування забруднюючих речовин сталася із запуском 13 жовтня 2017 року супутника Sentinel-5 Precursor (Sentinel-5P), оснащеного приладом TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI)[3]. Для газових компонент атмосферного повітря було досягнуто деталізації в 7,5×3,5 км, яку згодом було поліпшено до 5,5×3,5 км [4]. Уперше на основі супутникових даних вдалося поглянути на забруднення атмосферного повітря не лише в регіональному масштабі, а й у межах великих міст та промислових районів [35—39]. З огляду на унікальну на сьогодні деталізацію супутника Sentinel-5P та актуальні напрями розвитку супутникового моніторингу

[1] SCIAMACHY Overview. https://earth.esa.int/eogateway/instruments/sciamachy/description

[2] About OMI. https://aura.gsfc.nasa.gov/omi.html

[3] Sentinel-5P. Sentinel Online. ESA. https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p

[4] News. Copernicus Sentinel-5P increased spatial resolution change now operational. https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/news/-/asset_publisher/xR9e/content/copernicus-sentinel-5-p-increased-spatial-resolution-change-now-operational

забруднення атмосферного повітря, в цій роботі робимо акцент саме на цьому супутнику та результатах його зондувань. Хоча пропонований матеріал може бути корисним і для роботи з іншими супутниковими місіями, спрямованими на визначення хімічного складу атмосферного повітря.

Ознайомившись із наведеним вище текстом, читач може запитати: а чому ми говоримо про настільки грубу просторову роздільну здатність під час дослідження забруднення атмосфери, якщо, наприклад, є можливість аналізувати аерозолі з просторовою роздільною здатністю менше 1 км [40]? Відповідь на це запитання і привела нас до ідеї написання цієї частини монографії, присвяченої супутниковому зондуванню забруднюючих речовин. Серед хімічних складових атмосферного повітря зондування газових компонент є набагато складнішим порівняно з твердими частинками. Незважаючи на можливості деталізованого виявлення характеристик аерозолю в атмосфері, інформацію про хімізм процесів емісії неможливо отримати, маючи лише супутникові дані щодо твердих частинок в атмосфері. Зондування газових компонент дає набагато ширшу інформацію про реальні процеси, що призводять до емісії забруднюючих речовин та погіршення якості атмосферного повітря. Крім того, відмінності у фізичних і хімічних особливостях між твердими частинками та газовими складовими настільки велика, а процес обробки й аналізу даних настільки різний, що це зумовлює потребу обов'язкового розділення опису цих хімічних складових. Отже, ця частина присвячена аналізу саме газових компонент.

Відмінність є також і серед газових складових. Той же супутник Sentinel-5P надає дані і щодо забруднюючих речовин (таких як, наприклад, діоксид азоту), і щодо парникових газів (зокрема, метан чи водяна пара), і щодо озону, більша частина якого в атмосферному стовпі зосереджена в стратосфері і формує озоновий шар. Хоча парникові гази багато в чому і є антропогенними забруднювачами, їх варто розглядати в рамках окремих досліджень передусім з точки зору впливу на клімат та перебіг атмосферних процесів. Нашою метою було встановлення закономірностей розподілу забруднюючих речовин. Зважаючи на те, що супутникові дані хімічних складових — це інтегрований за висотою показник, ми не будемо тут розглядати загальний вміст озону. Хоча O_3 і є забруднювачем, у стовпі атмосфери частка приземного озону мізерна. Тому ця робота присвячена аналізу чотирьох основних забруднюючих речовин, які вимірюються супутником Sentinel-5P: діоксиду азоту (NO_2), монооксиду вуглецю (CO), діоксиду сірки (SO_2) і формальдегіду (CH_2O).

3.1. Особливості обробки супутникових даних забруднюючих речовин

3.1.1. Характеристика супутника Sentinel-5P і даних зондування

Запуск супутника Sentinel-5P з приладом TROPOMI на борту став логічним продовженням роботи попередніх супутникових місій із приладами SCIAMACHY та OMI з усебічного дослідження динаміки хімічних складових в атмосферному повітрі. Надходження даних від TROPOMI синхронізували з іншим приладом — The Global Ozone Monitoring Experiment 2 (GOME-2) на борту супутників серії Meteorological Operational satellite (MetOp) [41]. GOME-2 має нижчу просторову роздільну здатність, проте їх комбінація дозволяє створювати серію з двох вимірювань на день.

Супутник Sentienel-5P рухається за сонячно-синхронною орбітою з циклом 16 днів, тобто покриття території з однаковими координатами відбувається один раз на 16 днів. Траєкторію руху Sentinel-5P розраховано так, щоб отримувати дані спостережень одразу після опівдня (о 13:30 за місцевим сонячним часом). Цим розробники намагалися задовольнити кілька вимог [41]. По-перше, в денні години граничний шар зазвичай добре розвинений і найбільш об'єктивно відображає забруднення атмосферного повітря, оскільки в цей час спостерігається активність більшості антропогенних джерел викидів. По-друге, зондування опівдні дозволяє мати достатню кількість часу для того, щоб спрогнозувати якість атмосферного повітря на наступний день. По-третє, цей час та відповідна траєкторія багато в чому узгоджуватиметься з іншими супутниковими місіями: MetOp, Aura і Suomi NPP (Suomi National Polar-orbiting Partnership). Наземний сегмент супутника Sentinel-5P складається з трьох частин: Flight Operations Segment (FOS), Payload Data-processing Ground Segment (PDGS) та Mission Planning Facility (MPF) [41], які здійснюють контроль польоту супутника, отримують дані зондування, обробляють їх, корегують та конвертують з одного рівня архівації в інший.

TROPOMI — багатоспектральний прилад, який використовує пасивні методи зондування, фіксуючи відбите від атмосфери сонячне випромінювання та власне випромінювання Землі[5]. TROPOMI складається з чотирьох спектрометрів з оптикою та сенсорами для різних довжин хвиль: середньої області ультрафіолетового 270—320 нм (прийняте в літературі скорочення UV), близького ультрафіолетового та видимого випромінювання 320—490 нм (UVIS), близького інфрачервоного випромінювання 710—775 нм (NIR) та короткохвильового інфрачервоного випромінювання

[5] Instrumental Payload. https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p/instrumental-payload

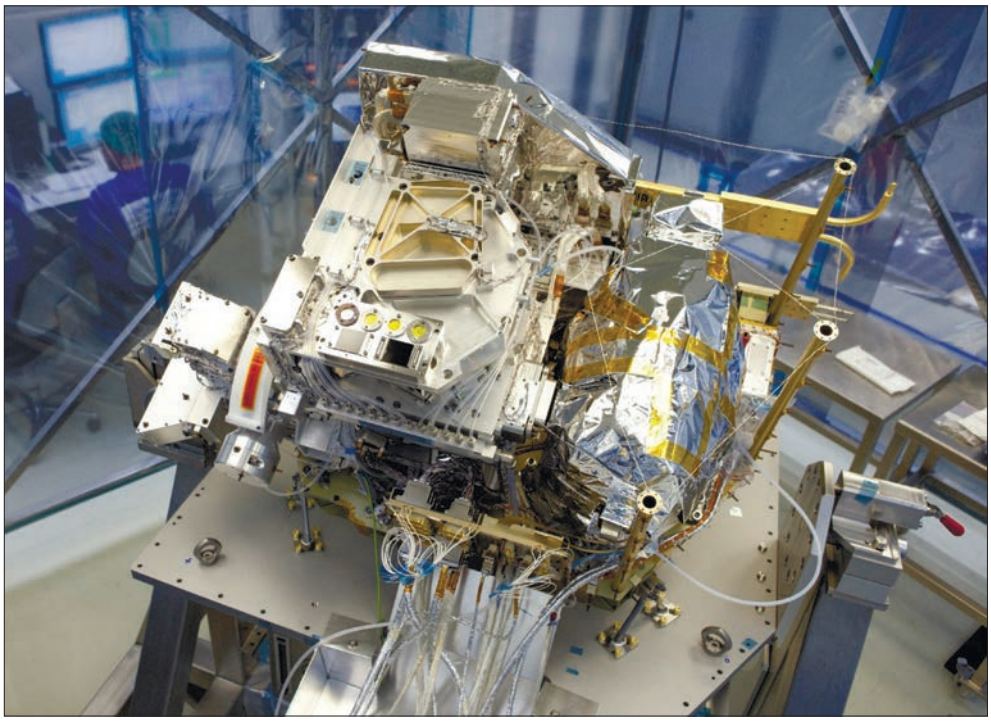


Рис. 3.1. Супутниковий прилад TROPOMI (джерело: https://sentinels.copernicus.eu)

2305—2385 нм (SWIR). Кожен зі спектрометрів ділиться на дві частини, в результаті чого отримується вісім спектральних каналів. Зовнішній вигляд TROPOMI наведено на рис. 3.1.

Дані супутникових спостережень представлено у вигляді різних рівнів архівації[6]. Найнижчим рівнем є нульовий (Level-0), недоступний широкому колу користувачів. Дані Level-0 являють собою впорядковані у часі результати вимірювань спектрометрів. Разом із ними представлено відомості про висоту польоту супутника і розташування на орбіті, різноманітна технічна та інженерна інформація, необхідна для подальшої обробки вимірювань, яка відбувається вже на наземних сегментах.

Перший рівень архівації даних (Level-1) являє собою оброблену інформацію про інтенсивність випромінювання на верхній межі атмосфери для всіх визначених довжин хвиль. Більш того, для даних Level-1 з'являється координатна прив'язка. Дані Level-1 можуть поділятися на три підгрупи. Дані Level-1A є прив'язаними в часі даними спектрометрів, які супроводжуються додатковою інформацією, зокрема радіометричними та геоме-

[6] Data Products. https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p/data-products

тричними коефіцієнтами калібрування, а також розширеною порівняно з Level-0 геопросторовою інформацією про розташування супутника. Дані Level-1B — це дані Level-1A, конвертовані в одиниці вимірювання спектральних характеристик. І остання підгрупа даних Level-1C містить розширену інформацію про характеристики спектрів випромінювання, а також інформацію про те, які дані з Level-1B були скопійовані напряму, а які оброблені і з якою метою. Дані Level-1 доступні для широкого загалу користувачів і представлені у вигляді продуктів, наведених у табл. 3.1. Стовпчик «Тип файлу» у табл. 3.1 є, власне, назвою файлу, за яким можна орієнтуватися та завантажувати відповідний супутниковий продукт.

Загалом є 8 супутникових продуктів з інтенсивністю випромінювання на певних довжинах хвиль, які позначаються літерами RA (від англ. radiance), BD (band) та номером діапазону від найкоротших до найдовших хвиль. Наявні ще два продукти з літерами IR (irradiance) — інтенсивність випромінювання, що надійшла від Сонця, а не від Землі. Порівняння RA з IR дозволяє оцінити ступінь послаблення випромінювання в земній атмосфері для відповідного діапазону довжин хвиль.

Другим рівнем архівації даних (Level-2) є супутникові продукти з даними вмісту хімічних складових в атмосферному повітрі (а також характеристик хмарності) з тією самою просторовою роздільною здатністю та географічним розташуванням, що й дані Level-1. Як вже зазначалося, дані Level-2 найбільш зручні для використання в більшості прикладних робіт із супутникового зондування забруднюючих речовин. Часто супутникові дані Level-2 в іноземній літературі називають геофізичними супутникови-

Таблиця 3.1

Інформація про супутникові продукти Sentinel-5P першого рівня архівації*

Тип файлу	Спектрометр	Довжина хвилі, нм
L1B_RA_BD1	UV	270—300
L1B_RA_BD2	UV	300—320
L1B_RA_BD3	UVIS	320—405
L1B_RA_BD4	UVIS	405—500
L1B_RA_BD5	NIR	675—725
L1B_RA_BD6	NIR	725—775
L1B_RA_BD7	SWIR	2305—2345
L1B_RA_BD8	SWIR	2345—2385
L1B_IR_UVN	UVN (UV+VIS+NIR)	270—775
L1B_IR_SIR	SWIR	2305—2385

* Products and Algorithms. https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-5p/products-algorithms

ми продуктами. Повний список супутникових продуктів Sentinel-5P другого рівня архівації наведено в табл. 3.2.

Усі представлені тут розрахунки виконано з використанням даних Level-2 та відповідних продуктів для забруднюючих речовин: «L2__NO_2___», «L2__SO_2___», «L2__CO____» та «L2__HCHO__».

Для супутника Sentinel-5P дані другого рівня архівації є кінцевими. Проте, залежно від подальшої обробки супутникових продуктів Level-2, існують ще й вищі рівні архівації даних. Дані Level-3 є супутниковими продуктами, представленими в певній регулярній координатній сітці. Часто дані Level-3 надають користувачам у картографічних варіантах. Більше того, це можуть бути пораховані тижневі, декадні, місячні та інші осереднені дані з Level-2. Часто ті чи інші організації створюють продукти Level-3, надаючи їх як на безоплатній, так і на платній основі. Подібні продукти є і для Sentinel-5P. Передусім дані Level-3 призначені для користувачів, які не володіють методами обробки супутникових даних. З одного боку, їх використання є зручним і дозволяє широкому загалу аналізувати супутникову інформацію, але з іншого боку, інформація подається обробленою певними алгоритмами, на які користувачі не можуть впливати чи обирати їх. За певних метеорологічних умов або на певних географічних територіях дані Level-3, створені стандартними алгоритмами, можуть мати неузгодженості, які вже неможливо виправити. Саме тому для фахівців, які працюють з вузькими прикладними

Таблиця 3.2

Інформація про супутникові продукти Sentinel-5P другого рівня архівації

Тип файлу	Параметр
L2__O3____	Загальний вміст озону (O_3) в атмосфері
L2__O3_TCL	Тропосферний вміст озону (O_3)
L2__O3__PR	Вертикальний профіль озону (O_3)
L2__NO2___	Загальний та тропосферний вміст діоксиду азоту (NO_2) в атмосфері
L2__SO2___	Загальний вміст діоксиду сірки (SO_2) в атмосфері
L2__CO____	Загальний вміст монооксиду вуглецю (CO) в атмосфері
L2__CH4___	Загальний вміст метану (CH_4) в атмосфері
L2__HCHO__	Загальний вміст формальдегіду (CH_2O) в атмосфері
L2__CLOUD_	Частка хмарності, альбедо
L2__AER_AI	Ультрафіолетовий аерозольний індекс
L2__AER_LH	Висота аерозольного шару
UV product	Приземна еритемна доза ультрафіолету
L2__NP_BDx, x = 3, 6, 7	Параметри хмарності із Suomi NPP VIIRS
AUX_CTMFC AUX_CTMANA	Попередні форми відновлених вертикальних профілів NO_2, CH_2O та SO_2

задачами, або для розроблення продуктів у певній країні чи регіоні важливо самостійно обирати методи виявлення помилок та фільтрування супутникових даних, що якнайкраще враховують зовнішні умови.

Ще один, четвертий, рівень архівації даних (Level-4) найчастіше являє собою продукт, подібний до реаналізу, та поєднує в собі дані різних джерел: супутникового зондування, моделювання, наземних вимірювань, літакових зондувань тощо.

Вихідні супутникові дані можуть мати різну якість, що залежить від ступеня оброблення інформації. А це, у свою чергу, визначає, наскільки швидко користувачі можуть отримати виміряні дані. Дані, що надходять та обробляються найшвидше, називають «близькі до реального часу» (near-real time — NRT). Відповідно, супутникові продукти в режимі NRT будемо позначати прийнятою абревіатурою NRTI. Для супутника Sentinel-5P NRTI-дані доступні користувачам приблизно через 3 години після зондування. Дані в режимі NRTI важливі для оперативного реагування та прийняття рішень, аналізу поточної ситуації стану забруднення атмосферного повітря та прогнозування на найближчі години або наступний день. Через пріоритет швидкості надходження NRTI-дані можуть мати більші похибки, ніж інший їх тип — режимний (offline — OFFL). Дані OFFL надходять протягом 12 годин для продуктів першого рівня архівації та впродовж близько 5 днів для продуктів другого рівня архівації. Дані OFFL краще використовувати для проведення аналізів за певний проміжок часу та наукових досліджень (звичайно, якщо ці дослідження не спрямовані на розроблення оперативних продуктів чи поліпшення оперативного отримання даних і прогнозування). Ще одним типом даних є так званий репроцесинг (reprocessing). Зазвичай до них відносять оновлені та перераховані дані після вдосконалення алгоритмів обробки супутникового зондування. Репроцесинг не має чіткої часової прив'язки, оновлення відбувається в міру розроблення та впровадження нових алгоритмів.

3.1.2. Виявлення помилок та фільтрування супутникових даних

Як було показано в попередньому підрозділі, супутникове зондування забруднюючих речовин є досить складною процедурою. Від моменту фіксації фотонів сенсором на орбіті до моменту конвертування у зрозумілі для широкого загалу дані виконуються численні процедури обробки та коригування супутникової інформації. На кожному кроці такого довгого ланцюжка обробки відбувається накопичення похибок. Усі вони накладаються на похибки процесу безпосереднього зондування атмосфери, що формуються під впливом метеорологічних умов, хімічного складу атмосферного повітря в момент зондування, типу підстильної поверхні з власними відбивними властивостями, характеристиками хмар, кута сканування тощо. Як резуль-

тат, кінцеві дані, що надаються користувачу, можуть мати значні неточності. Тому перед використанням з будь-якою метою супутникової інформації необхідно насамперед проводити перевірку надійності даних та фільтрувати виявлені недостовірні дані, але, що найскладніше, це не гарантує стовідсоткової надійності отриманих значень. Проте за різними додатковими характеристиками фахівець може розрізнити невідфільтровані підозрілі значення та правильно інтерпретувати отримані дані, представивши максимально повну картину вмісту забруднюючих речовин в атмосферному повітрі з поясненням їх природи, умов формування та перенесення.

Зазвичай користувачам дається можливість використання супутникових даних різних рівнів архівації. Тут ми розглянемо особливості обробки другого рівня, тобто даних загального вмісту забруднюючих речовин в атмосферному повітрі в тій самій просторовій роздільній здатності, що й дані інтенсивності випромінювання, оскільки вважаємо другий рівень архівації найбільш зручним для аналізу забруднення атмосферного повітря за супутниковими даними. По-перше, вихідними даними для роботи користувача є вміст забруднюючих речовин, тобто основний предмет зацікавленості. По-друге, другий рівень архівації зі все ще невпорядкованими в регулярну сітку координатами залишає широкі можливості для правильного підбору методу обробки даних залежно від поставленого завдання. Погодьтеся, якщо метою є проаналізувати наслідки незначних викидів забруднюючих речовин окремого великого підприємства, то важко це зробити, маючи дані третього рівня архівації, які вже відфільтровані певними алгоритмами та укрупнені з метою впорядкування в регулярну координатну сітку. І потретє, дуже часто саме другий рівень архівації є кінцевим продуктом для представлення користувачам.

Дані щодо вмісту забруднюючих речовин в атмосферному повітрі найчастіше зберігаються у двійкових (бінарних) форматах: The Network Common Data Form (NetCDF[7]) та Hierarchical Data Format (HDF[8]). Це важливо розуміти, адже ці формати дозволяють зберігати більшу кількість наборів даних і містять необхідну додаткову інформацію для проведення фільтрування та подальшої інтерпретації отриманої картини. Серед наявних наборів даних можна знайти так званий індекс якості (quality assurance index), який скорочено прийнято позначати як QA [42—45]. Він подається для кожної точки, де існує значення вмісту забруднюючої речовини. Саме QA є основним показником для проведення фільтрування даних.

Показник QA змінюється від 0 до 1 та виражається у відносних одиницях. За умови QA = 0 значення вмісту забруднюючої речовини в точці вва-

[7] UCAR. Network Common Data Form (NetCDF). https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/

[8] The HDF Group. https://www.hdfgroup.org

жається повністю помилковим, а QA = 1 у тих точках, у яких інформація є повністю надійною. Якщо набрати достатню статистику даних, то виявиться, що QA = 1 спостерігається не так часто. Але і за менших значень QA дані вмісту забруднюючої речовини можуть бути фізично обґрунтованими та цілком узгоджуватися з процесами поблизу земної поверхні, які спричинили формування тієї чи іншої концентрації.

Для широкого загалу користувачів рекомендованим граничним значенням, за яким можна вважати дані надійними, є QA > 0,75. Тобто всі пікселі, для яких QA не перевищує 0,75 мають бути відфільтровані і не братися до уваги в подальшій обробці. Граничний показник на такому рівні дозволяє відфільтрувати практично всі точки, де спостерігалася хмарність. Якщо ж бути ще точнішим, то відфільтровуються всі пікселі, де частка випромінювання, яка надійшла від хмарності (cloud radiance fraction) перевищує 50 %. Більш того, граничний показник на рівні QA > 0,75 відфільтровує похибки не лише зумовлені хмарністю, а й спричинені несприятливою відбивною здатністю підстильної поверхні та складнощами відновлення даних забруднюючої речовини. Всі пікселі, які задовольняють умові QA > 0,75, можуть використовуватися надалі.

Обраний шлях із граничним показником QA > 0,75 є надійним, але при цьому втрачається велика кількість значень, які також можуть бути обґрунтованими та відображати реальний вміст забруднюючих речовин. Наприклад, за відсутності значних джерел викидів забруднюючих речовин на поверхні Землі, що є актуальним для сільської або високогірної місцевості, хмарність не є проблемою, адже у підхмарному шарі концентрації не настільки високі, щоб впливати на загальний вміст забруднення в усьому стовпі атмосфери. Варто лише згадати частоту формування хмар, особливо в помірних широтах, щоб зрозуміти, як багато інформації втрачається в разі такого «жорсткого» фільтрування. Виходом із цієї ситуації є послаблення умов до граничного показника QA, але з більш детальною подальшою обробкою даних. Ще одним рекомендованим граничним показником є QA > 0,5. У такий спосіб відфільтровуються всі пікселі, для яких є значні похибки, спричинені складнощами відновлення даних забруднюючої речовини, проте більшість пікселів із хмарним покривом залишаються. Звичайно, будуть видалені пікселі, що потрапили на територію з купчасто-дощовою хмарністю, та пікселі поблизу атмосферних фронтів. Приклад просторового розподілу забруднюючих речовин та відповідного показника QA наведено на рис. 3.2 і рис. 3.3.

Перше, що чітко простежується з рис. 3.2 і рис. 3.3, — це відмінність у значеннях QA для різних забруднюючих речовин. Так, для NO_2 майже всі значення QA над зображеною територією можуть бути в подальшому оброблені (оскільки QA > 0,5). Водночас кількість ненадійних показників для CO значно більша. Тобто для одного й того самого стовпа атмосферного

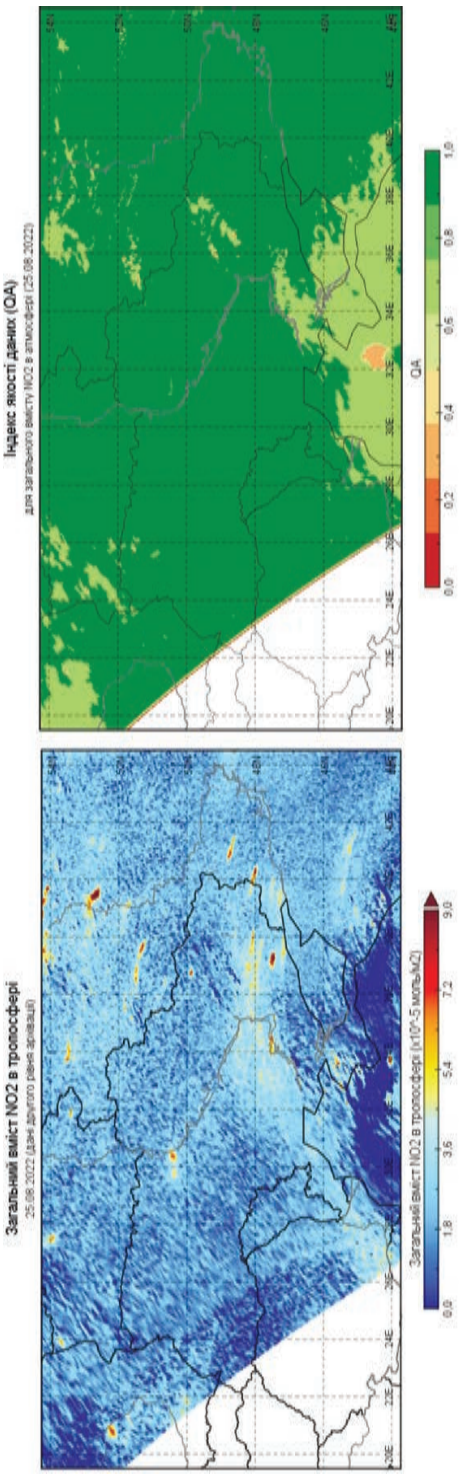


Рис. 3.2. Технічна візуалізація просторового розподілу показника QA та загального вмісту відповідних забруднюючих речовин в атмосфері (NO_2, SO_2) на прикладі 25.08.2022 року на етапі обробки даних

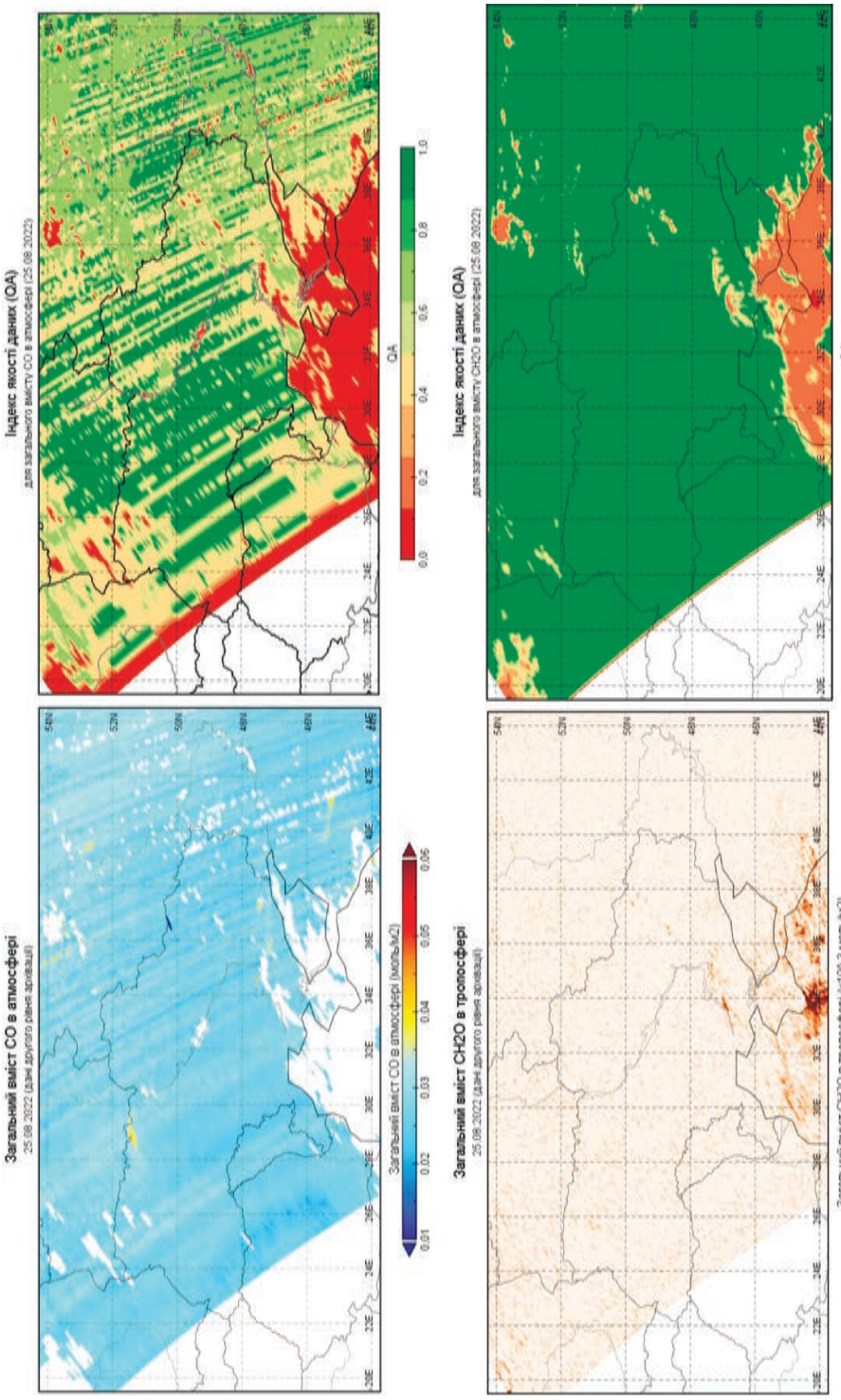


Рис. 3.3. Технічна візуалізація просторового розподілу показника QA та загального вмісту відповідних забруднюючих речовин в атмосфері (CO, CH_2O) на прикладі 25.08.2022 р. на етапі обробки даних

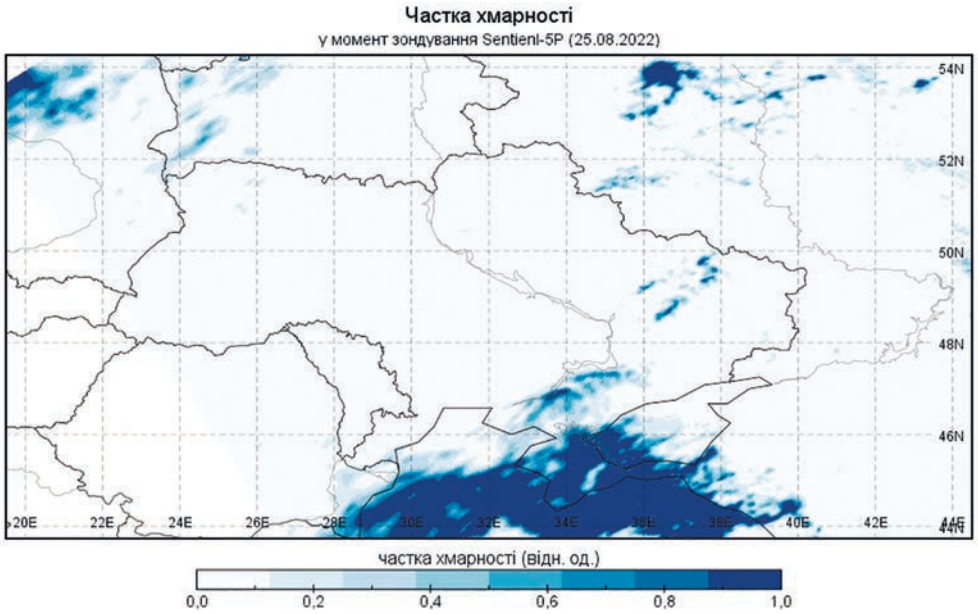


Рис. 3.4. **Технічна візуалізація просторового розподілу частки хмарності в момент зондування супутника Sentinel-5P 25.08.2022 року на етапі обробки даних**

повітря за однакових умов якість даних різниться залежно від забруднюючої речовини. Це пов'язано з різною складністю відновлення вмісту тієї чи іншої домішки, а також зі збігом вікон поглинання випромінювання на певній довжині хвилі з іншими хімічними складовими в атмосферному повітрі. Наприклад, CO вимірюється приладом TROPOMI на довжинах хвиль 2305—2385 нм [46]. На ці ж довжини хвиль припадають і спектри поглинання водяної пари, яка дуже поширена в атмосферному повітрі, тоді як NO_2 визначається на довжинах хвиль 405—465 нм [47], де водяна пара практично не становить перешкоди. Тому в однаковому стовпі атмосфери з підвищеним вмістом водяної пари NO_2 визначатиметься точніше, ніж CO, і, як результат,QA для NO_2 перевищуватиме QA для CO.

Друга особливість, яка також чітко простежується, полягає в залежності QA від хмарності (просторовий розподіл частки хмарності на прикладі 25.08.2022 року в момент зондування наведено на рис. 3.4). Як видно, хмарність, що спостерігалася над Чорним морем та Кримським півостровом у момент зондування, вплинула на якість даних настільки, що більшість значень CO, CH_2O і SO_2 над цією територією мають бути відфільтровані.

Якщо для супутникових даних не проводити перевірку якості й фільтрування, це може призвести до грубих помилкових суджень та висновків щодо реального забруднення атмосферного повітря. Припустимо, що дані з рис. 3.2 не були відфільтровані. В такому разі можна помилково сказа-

ти, що над Чорним морем спостерігається високий вміст CH_2O. Насправді, QA свідчить про інше — дані CH_2O над більшою частиною Чорного моря є вкрай ненадійними (а найімовірніше, абсолютно помилковими), тому ми не можемо сказати нічого про те, який вміст спостерігається над цими територіями.

Як уже зазначалося, дані, для яких QA > 0,75, можуть використовуватися відразу, а дані, для яких QA > 0,5, мають проходити більш детальну перевірку. Суть такої перевірки полягає в наступному. Супутник, збираючи інформацію про випромінювання з різних висот, відтворює її з різною чутливістю. Відповідно, дані загального вмісту забруднюючих речовин, інтегровані за вертикальним профілем, складаються як з надійно відтвореної інформації про вміст речовин на певних висотах, так і з інформації з деяким наближенням. Для правильної інтерпретації просторового розподілу забруднюючих речовин, потрібно враховувати точність інформації, зібраної з різних висот. Це особливо важливо під час роботи з NRTI-даними. З цією метою використовують так званий усереднений кернел (averaging kernel), який виражається в безрозмірних одиницях і дані якого є у файлі разом із результатами зондування [48—50].

Усереднений кернел описує чутливість відтвореного профілю забруднюючої речовини до його реального профілю [48, 50]. Чим ближче усереднений кернел до 1,0, тим краще відображено реальний вміст забруднюючої речовини. В ідеальному (теоретичному) випадку за відсутності шумів під час отримання сигналу усереднений кернел дорівнює 1,0. На практиці за наявності шуму та похибок в обробленні отриманого сигналу значення можуть перевищувати 1,0, проте ми розуміємо під цим наявність хорошої чутливості до реального вмісту речовини в атмосфері.

Для супутника Sentinel-5P усереднений кернел подається для 35 вертикальних рівнів, які використовуються в моделі Tracer Model 5 (TM5) [51]. Цю модель застосовують під час обробки даних TROPOMI при переході від першого до другого рівня архівації [47]. Різницю між усередненим кернелом для хмарного та ясного неба показано на рис. 3.5 на прикладі NO_2, виміряного приладом TROPOMI супутника Sentinel-5P 25 серпня 2022 року.

Типовий вертикальний профіль усередненого кернела за безхмарного неба з високим QA має експоненціальну залежність (рис. 3.5). У граничному шарі атмосфери значення усередненого кернела зазвичай не перевищують 0,4 і зростають, досягаючи в середній тропосфері значення близького до 1,0, Така форма профілю і такі значення дозволяють стверджувати, що загальний вміст забруднюючої речовини відтворено правильно, а отже, ми можемо довіряти отриманому значенню. Водночас за хмарного неба усереднений кернел не має експоненціальної залежності, особливо в підхмарному шарі. Як видно на прикладі одного з пікселів на рис. 3.5, усереднений кернел за хмарного неба близький до 0 для висот середньої тропосфери. Це

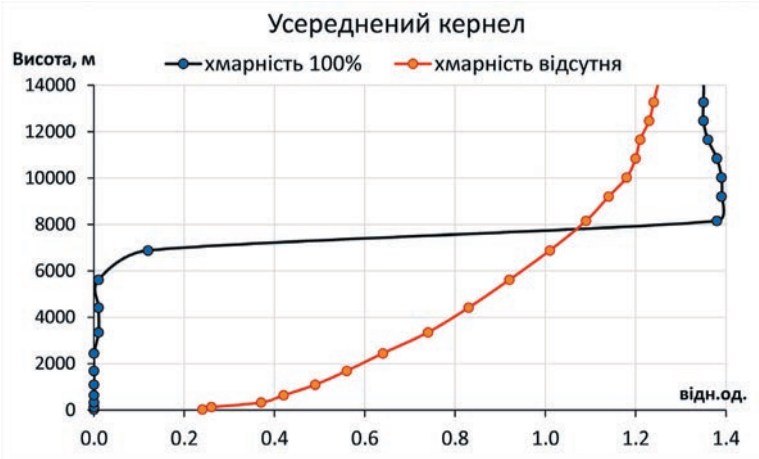


Рис. 3.5. Усереднений кернел для NO_2 за хмарного та ясного неба на прикладі 25.08.2022 року (прилад — TROPOMI)

означає, що забруднення до цих висот не було відтворено правильно, тобто ми не маємо жодної інформації і не можемо робити жодних висновків про розподіл забруднення поблизу земної поверхні, а також про забруднення, перенесене з інших територій на незначних висотах.

Отже, якщо ми маємо значення вмісту забруднюючої речовини, для якої QA перебуває в межах від 0,5 до 0,75, то переходимо до аналізу усередненого кернелу. Якщо на території, яку покриває відповідний піксель, є джерело викиду забруднюючої речовини, таке значення має відфільтровуватися, адже внесок наземного джерела викидів може бути визначальним і формувати значення всього стовпа атмосфери. Проте ми нічого не можемо про нього сказати, оскільки на нижніх рівнях усереднений кернел близький до 0, тобто вміст забруднюючої речовини на цих висотах не було відтворено. І навпаки, варто залишати значення вмісту забруднюючої речовини для подальшого аналізу, якщо відомо про відсутність значних джерел викидів у приземному шарі.

Після процедури фільтрування ненадійних значень із застосуванням QA та усередненого кернелу дані вмісту забруднюючих речовин готові для подальшого використання та аналізу. Однак рекомендовано проводити ще один етап обробки для підвищення надійності даних шляхом просторового або часового осереднення. При цьому слід мати на увазі, що таку процедуру не можна застосовувати до деяких задач, пов'язаних з локалізацією даних (downscaling), або для оперативного аналізу. Локалізація даних передбачає збереження вихідних розмірів пікселя, що дозволятиме ще більш деталізувати інформацію або за допомогою розділення тих частин пікселя, що перекриваються, або з використанням інтерполяції, або ж складнішими методами локалізації із залученням машинного навчання чи моделюван-

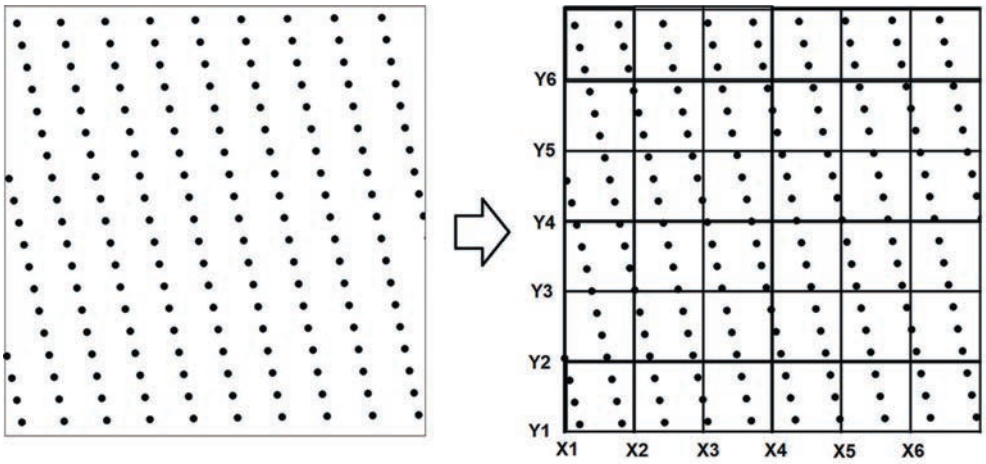


Рис. 3.6. Схематичне зображення прив'язки супутникових даних (точок) до регулярної сітки [52]

ня. Якщо задача не передбачає оперативного використання даних (тобто роботи з одиничним файлом у режимі NRTI) та локалізації, тоді отримані відфільтровані значення проходять додаткову обробку у вигляді просторового або часового осереднення.

Часове осереднення проводять осередненням всіх пікселів, які мають однакові координати за певний проміжок часу. Це дозволяє згладжувати похибки в рядах спостережень та отримувати більш надійні показники. Під час часового осереднення важливо пам'ятати про орбітальний цикл супутника. Наприклад, для Sentinel-5P він становить 16 днів[9], тобто піксель потрапляє в одні й ті самі координати один раз на 16 днів. Відповідно, осереднювати в часі можна лише ті пікселі, які мають однакові координати.

Зручніше використовувати осереднення в просторі. В такому разі також згладжуватимуться похибки. Враховуючи орбітальний цикл Sentinel-5P, зрозуміло, що супутник покриває досліджувану територію по-різному з певною періодичністю. Проте часові ряди за кожен день спостережень (у випадку Sentinel-5P) з однаковими координатами можна сформувати, якщо задати власну регулярну сітку, розміри квадрата якої перевищують просторову роздільну здатність супутника. У процесі прив'язки осереднюються в просторі всі пікселі, що потрапляють до заданої регулярної сітки (рис. 3.6). У результаті обчислюється середній вміст забруднюючої речовини у квадраті з координатами $[X_iY_i, X_{i+1}Y_i, X_iY_{i+1}, X_{i+1}Y_{i+1}]$. З метою аналізу даних загалом для всієї території України достатньо використати сітку з розмірами 0,1×0,1, в межах якої осереднюються всі пікселі, що потрапили до відповідного квадрата.

[9] Orbit. Sentinel-5P Satellite Description. URL: https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p/orbit

3.1.3. Автоматизована система оцінки якості атмосферного повітря на основі супутникових даних

На початку 2020 року в Українському гідрометеорологічному інституті ДСНС України та НАН України було розроблено першу версію повністю автоматизованої системи оперативного моніторингу якості атмосферного повітря за даними супутникових спостережень Sentinel-5P. Розроблена система дозволяє отримувати дані про вміст забруднюючих речовин в атмосферному повітрі щодня, повністю охоплюючи територію України. Вже у квітні 2020 року система пройшла випробування під час лісових пожеж у Київській та Житомирській областях, надаючи дані щодо забруднення атмосферного повітря та поширення домішок від осередків пожеж [10, 53, 54]. З моменту створення система моніторингу постійно вдосконалюється, додаються інші хімічні складові, деталізується просторовий розподіл над окремими містами з просторовою роздільною здатністю 0,02×0,02, вдосконалюються алгоритми фільтрування та методи обробки даних.

Використання супутникових даних дозволило виявляти осередки високих рівнів забруднення атмосферного повітря, зокрема й у віддалених районах. Щодня проводиться супутниковий моніторинг викидів від автотранспорту та роботи підприємств у містах, пожеж у природних екосистемах, наслідків надзвичайних ситуацій, транскордонного перенесення забруднення тощо. З початком повномасштабного вторгнення РФ на територію України у 2022 році супутникові дані забруднення атмосферного повітря відіграють важливу роль у виявленні високого вмісту забруднюючих речовин, спричиненого воєнними діями. Це дозволяє проводити аналіз якості атмосферного повітря в районах інтенсивних пожеж у природних екосистемах поблизу лінії зіткнення, фіксувати наслідки викидів забруднюючих речовин після ракетних ударів по нафтобазам та промисловим об'єктам тощо.

Система повністю автоматизована і налаштована на завантаження, обробку та візуалізацію Level-2 NRTI-даних. Програмні модулі написано мовами програмування Python, VB.NET, а також використано низку bat-скриптів.

Усю роботу автоматизованої системи можна розділити на 5 етапів: підготовчий, отримання вихідних даних, оброблення, візуалізації, завершення.

Робота системи починається з виконання підготовчих процедур. Передусім перевіряється чи ввімкнено робочий комп'ютер, на якому встановлено систему. Якщо ні, здійснюється автоматичне ввімкнення та запуск системи, що гарантує безперервну щоденну роботу. Певні непередбачувані обставини можуть виникнути і під час роботи автоматизованої системи, наприклад зникнення інтернет-зв'язку в процесі завантаження даних. Унаслідок цього можуть утворитися різноманітні тимчасові файли, які зали-

шаться невидаленими, а тому запускається модуль перевірки наявності тимчасових файлів. Якщо такі файли знайдено, відбувається їх видалення та підготовка робочих директорій до майбутньої роботи системи. На цьому підготовчий етап завершується.

Етап отримання вихідних даних розпочинається з надсилання запитів та завантаження даних. Усі вихідні дані супутника Sentinel-5P зберігаються у спеціально створеному хабі[10]. Завантаження даних (кожного окремого файлу) відбувається з використанням спеціального 32-значного ідентифікатора (Universally unique identifier — UUID), що являє собою згенерований код. Цей код невідомий від самого початку, що унеможливлює відразу пряме завантаження файлів з даними. Проте список доступних файлів з їх UUID можна отримати, надіславши попередній запит до хабу. Запит є обмеженим — максимальна кількість файлів у списку не може перевищувати 50. Враховуючи відносно велику площу території України та порівняно велику кількість доступних супутникових продуктів, запит за певним текстом метаданих може видати кількасот результатів, а до списку потраплять лише перші 50. Тому для отримання всіх необхідних файлів запит має бути максимально продуманим. Серед усіх можливих варіантів було вибрано запит за часом зондування території України. Оскільки час прольоту Sentinel-5P над територією України розраховано наперед з точністю до хвилини, автоматизована система щодня визначає час прольоту супутника (від hh.mm до hh.mm) і формує запит до хабу в такому вигляді:

https://s5phub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/Products?$select=[опція запиту (час зондування)].

Запит та вивантаження результатів відбувається з використанням утиліти wget.exe[11]. У відповідь на запит завантажується xml-файл зі списком UUID файлів даних та іншою інформацією. Потім відповідний програмний модуль зчитує всю інформацію з xml-файлу, визначає, які файли потрібно завантажувати, і тимчасово вносить до пам'яті всі необхідні UUID. Завантаження відбувається шляхом реалізації відповідної wget-команди:

https://s5phub.copernicus.eu/dhus/odata/v1/Products('" & [заданий UUID] & "')/$value.

Після завантаження файлу з вихідними даними для зручності роботи алгоритму йому надається порядковий номер, і він одразу перейменовується у вигляді «XXX_I.nc», де XXX — хімічна формула домішки, I — порядковий номер файлу з домішкою (наприклад, «NO2_2.nc»). Вихідні дані завантажуються у форматі NetCDF. При цьому вихідні файли завантажуються тимчасово. Їх загальний об'єм може досягати 1 Гбайта, тому після завершення обробки даних, усі ці файли видаляються.

[10] Sentinel-5P Pre-Operations Data Hub. https://s5phub.copernicus.eu/dhus/#/home
[11] GNU Wget. https://www.gnu.org/software/wget/

Після завантаження даних робота єдиної інтегрованої системи розгалужується на кілька «гілок» залежно від оброблення даних та об'єкта моніторингу. Відбувається фільтрування ненадійних супутникових даних за процедурою, описаною у підрозділі 3.1.2. Після фільтрування вихідних даних залишаються виключно статистично надійні показники, які проходять прив'язку до регулярної сітки 0,1°×0,1° для території України та сітки 0,02×0,02 для міст. У разі якщо до квадрата 0,02×0,02 не потрапляє жоден з центрів вихідних пікселів, квадрат тимчасово залишається пустим та очікує запуску модуля інтерполяції, що й завершить процедуру локалізації даних методом крігінг-інтерполяції. Таким чином територія кожного міста характеризуватиметься чіткішим окресленням максимумів, що поліпшує ідентифікацію найбільш забруднених районів. Подібна процедура краще відображає реальний розподіл забруднюючих речовин порівняно з простим «діленням» вихідного пікселя на дрібніші частини.

Сітка задається відносно меж доменів, визначених для всієї території України та кожного окремого міста (табл. 3.3). Станом на 2022 рік створено систему оперативного моніторингу для міст Дніпро, Київ, Кривий Ріг, Одеса, Харків, продовжується розроблення й удосконалення системи для всіх обласних центрів і великих промислових міст.

На етапі візуалізації створюються картосхеми просторового розподілу хімічних складових за даними супутника Sentinel-5P, які система архівує у відповідні каталоги. Для території України візуалізація здійснюється для NRTI-даних хмарності, NO_2, SO_2, CO, CH_2O та O_3; для міст — для NRTI-даних NO_2 та CO. Приклад візуалізації даних, що здійснюється автоматизованою системою оцінки якості атмосферного повітря на основі супутникових даних, наведено на рис. 3.7—3.17.

Система завершує свою роботу двома модулями. Один відповідає за видалення всіх тимчасово створених файлів та завантажених вихідних файлів, інший модуль виконує розсилку отриманих картосхем.

Таблиця 3.3

Межі доменів, що використовуються автоматизованою системою оцінки якості атмосферного повітря на основі супутникових даних Sentinel-5P (станом на 2022 рік)

Територія	ПН межа (°пн.ш.)	ПД межа (°пн.ш.)	ЗХ межа (°зх.д.)	СХ межа (°сх.д.)	Розмір пн-пд (°)	Розмір зх-сх (°)
Україна	54.00	44.00	21.00	41.00	10,00	20,00
м. Дніпро	48.70	48.20	34.60	35.40	0,50	0,80
м. Київ	50,70	50,00	30,00	31.00	0,70	1.00
м. Кривий Ріг	48.60	47.20	32.90	34.00	1.40	1.10
м. Одеса	46.65	46.20	30,40	31.00	0,45	0,60
м. Харків	50,20	49.75	35.80	36.60	0,45	0,80

Рис. 3.7. Приклад візуалізації просторового розподілу частки хмарності для території України

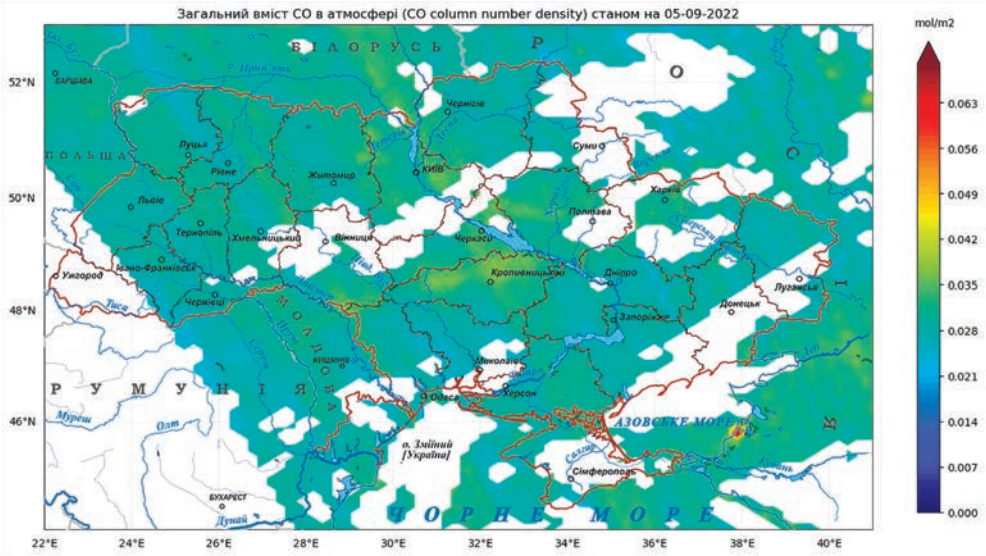


Рис. 3.8. Приклад візуалізації просторового розподілу загального вмісту CO для території України

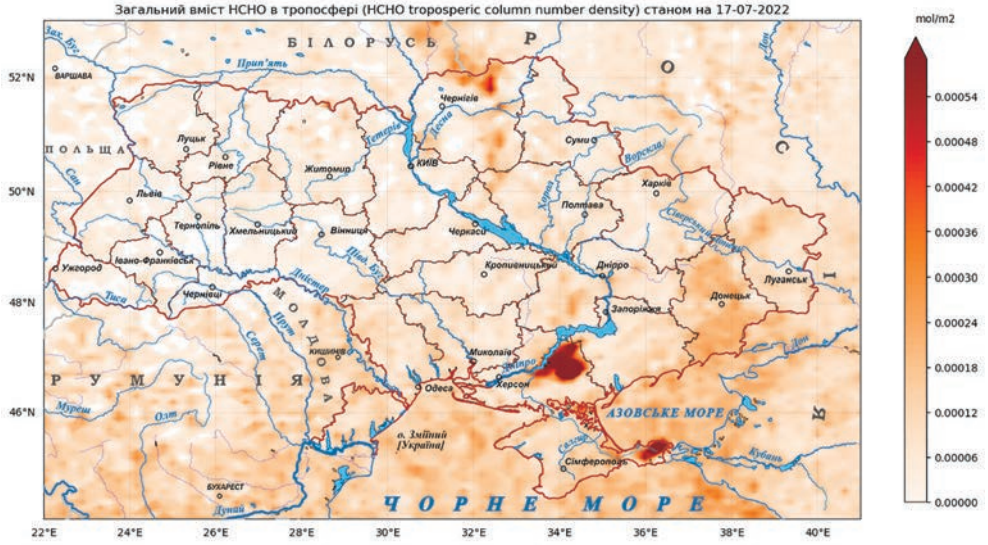


Рис. 3.9. Приклад візуалізації просторового розподілу загального вмісту CH_2O для території України

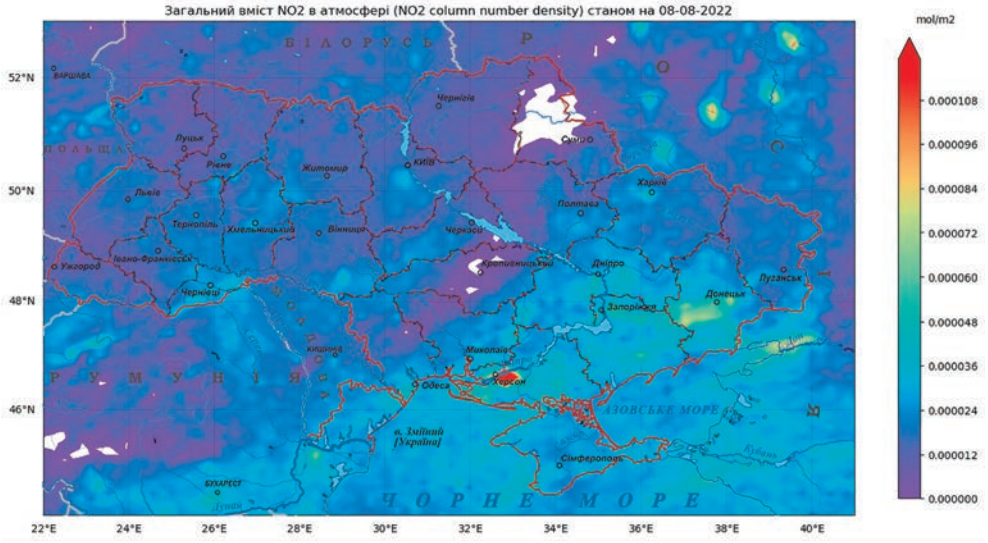


Рис. 3.10. Приклад візуалізації просторового розподілу загального вмісту NO_2 для території України

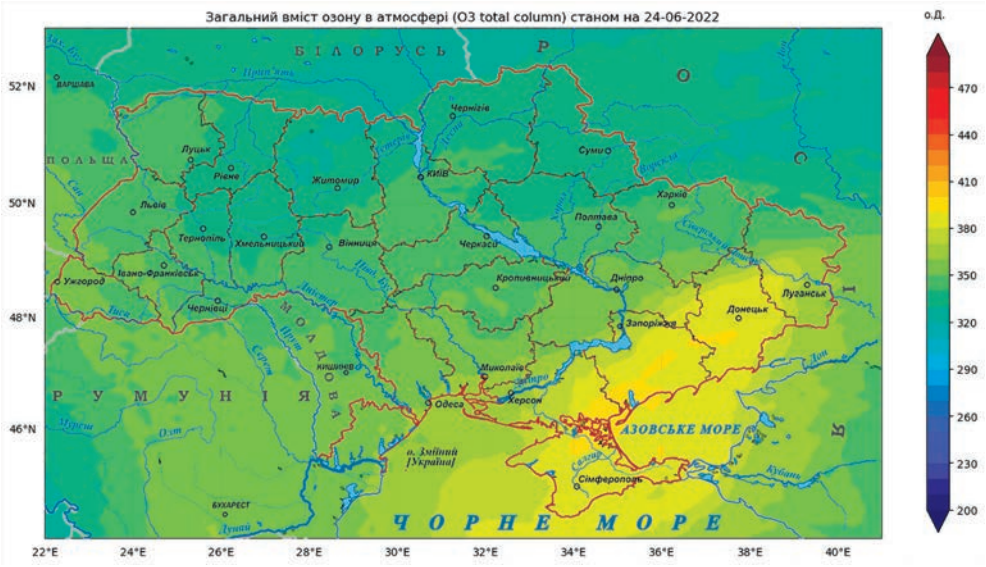
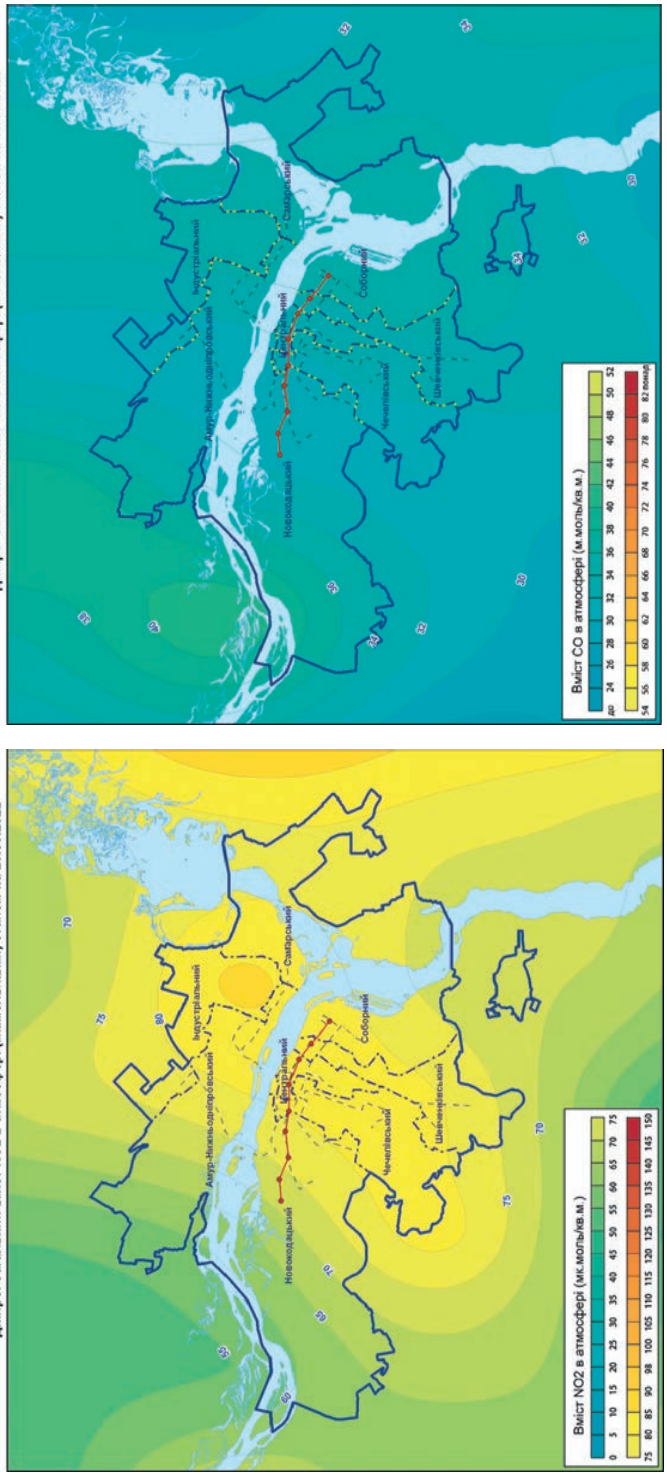


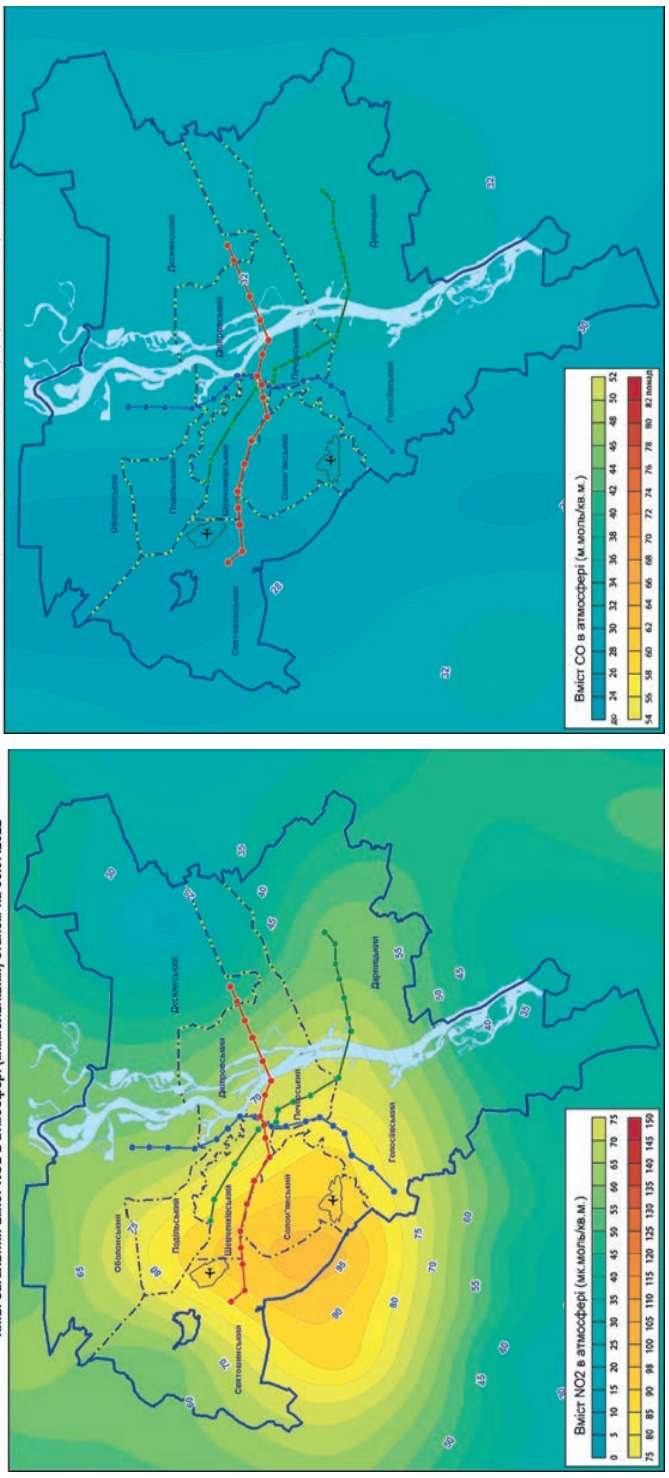
Рис. 3.11. Приклад візуалізації просторового розподілу загального вмісту O_3 для території України

Рис. 3.12. Приклад візуалізації просторового розподілу загального вмісту SO_2 для території України



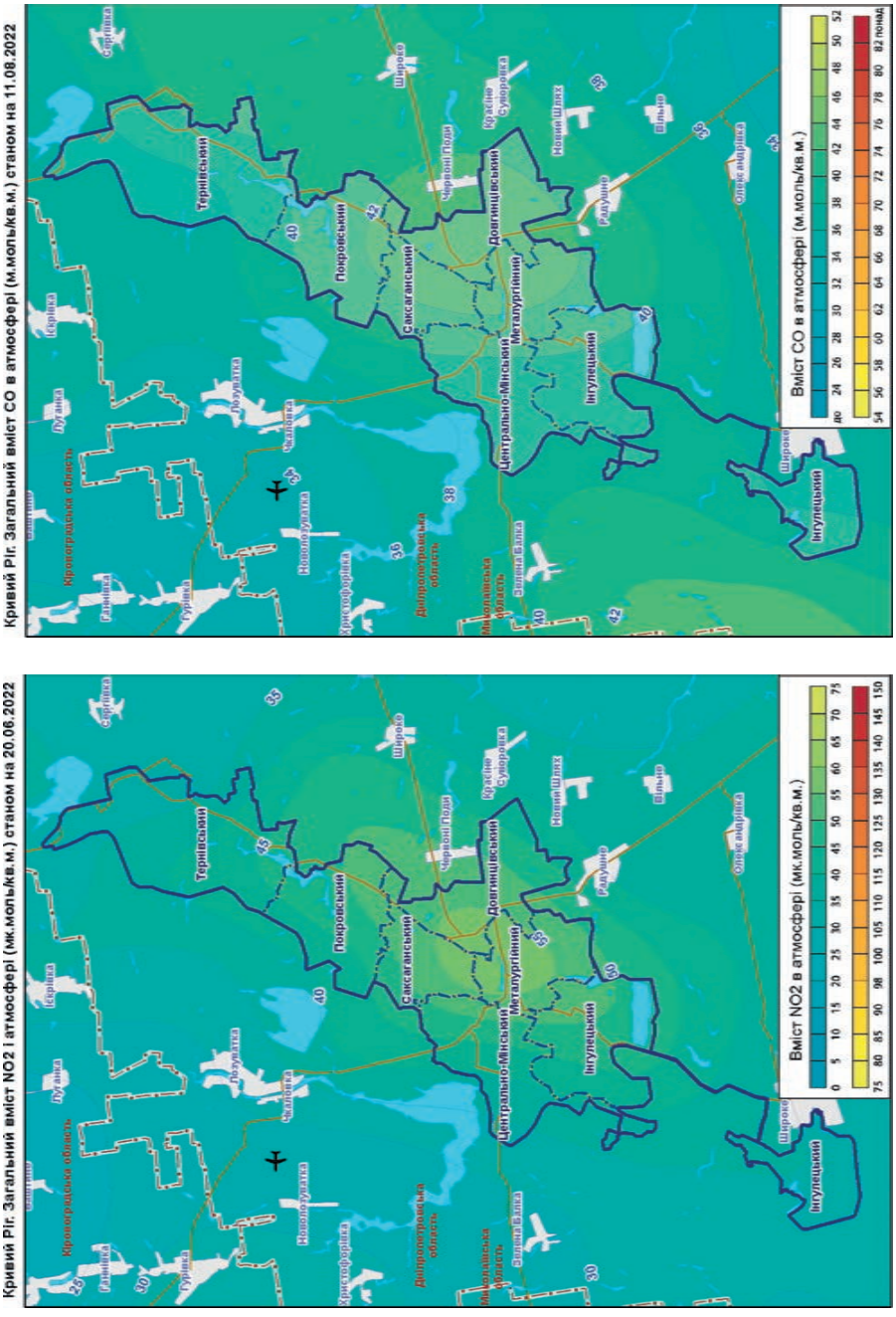
а *б*

Рис. 3.13. Приклад візуалізації просторового розподілу загального вмісту NO_2 (*а*) та CO (*б*) для території м. Дніпро



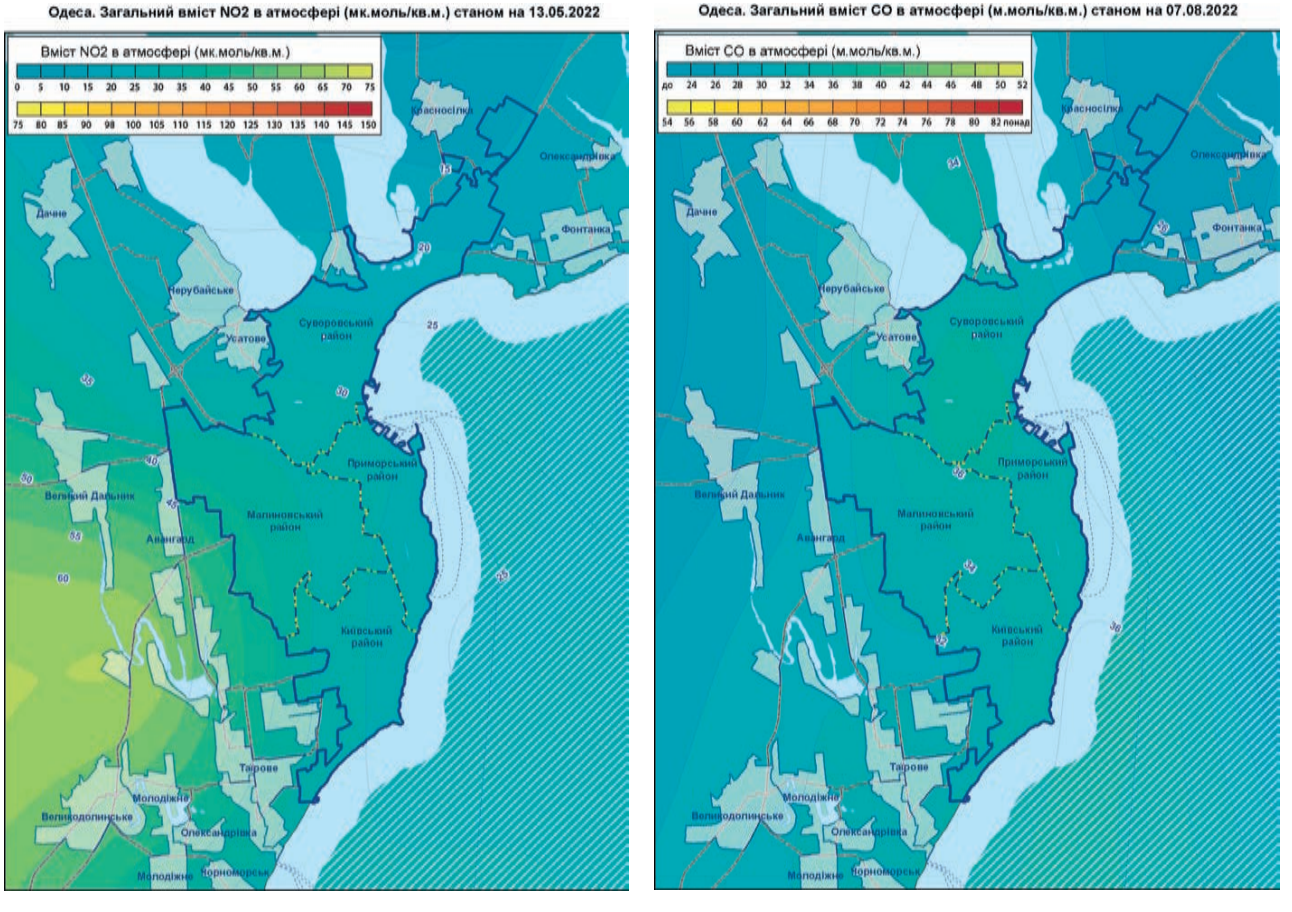
а *б*

Рис. 3.14. Приклад візуалізації просторового розподілу загального вмісту NO_2 (*а*) та CO (*б*) для території м. Київ



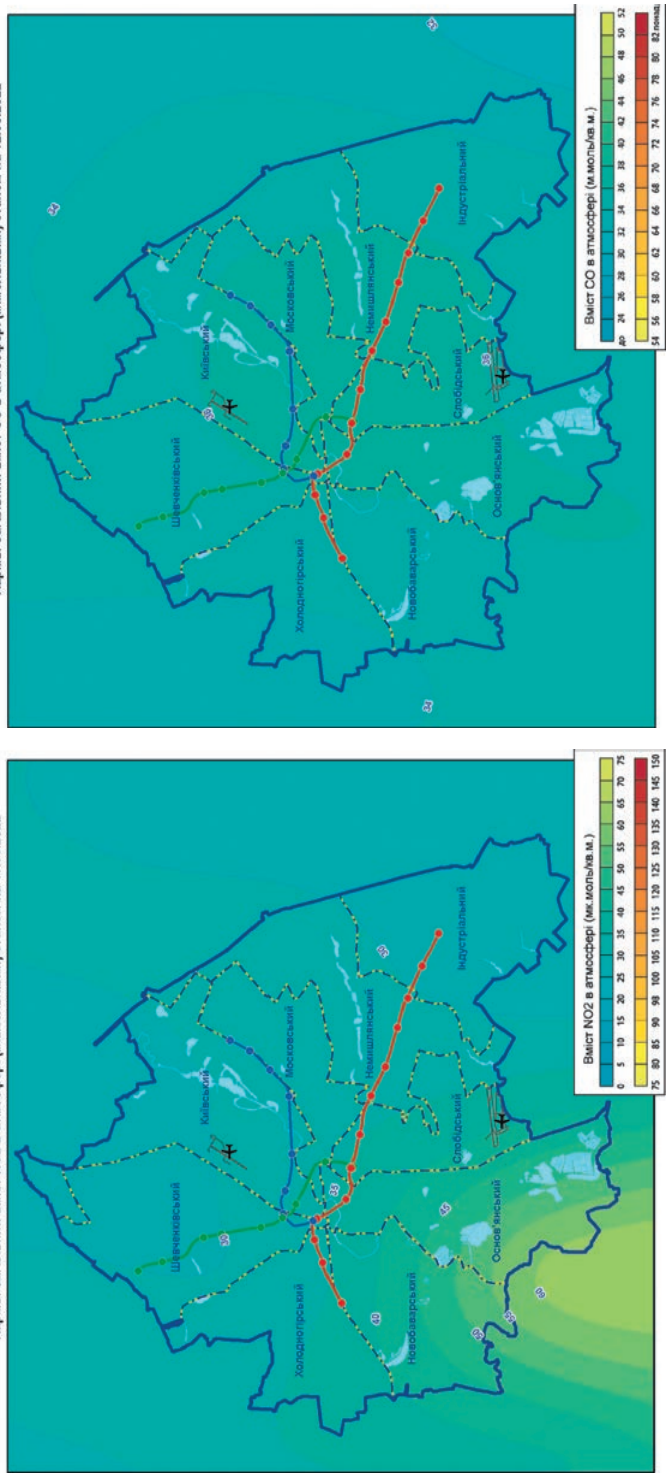
а *б*

Рис. 3.15. Приклад візуалізації просторового розподілу загального вмісту NO_2 (*а*) та CO (*б*) для території м. Кривий Ріг



а *б*

Рис. 3.16. Приклад візуалізації просторового розподілу загального вмісту NO_2 (*а*) та CO (*б*) для території м. Одеса



а *б*

Рис. 3.17. Приклад візуалізації просторового розподілу загального вмісту NO_2 (*а*) та CO (*б*) для території м. Харків

3.2. Закономірності просторово-часового розподілу забруднюючих речовин по території України

Особливості просторового розподілу та активності джерел викидів забруднюючих речовин в атмосферне повітря в Україні значно відрізняється від більшості країн Європи, що зумовлено історичними особливостями розвитку промисловості та великих міст. На відміну від багатьох розвинених європейських країн, де основним джерелом забруднення атмосферного повітря є автотранспорт, в Україні й досі значну роль (а в деяких районах і ключову) відіграє промисловість. Пік розвитку промисловості за часів Радянського Союзу змінився її занепадом у 1990-х роках, що позначилося на концентраціях забруднюючих речовин в атмосфері — вони істотно зменшилися. Однак на початку 2000-х років в Україні стрімко почала зростати кількість автотранспорту, що привело до трансформації поля забруднення у великих містах та зміщення осередків найвищих концентрацій у бік основних автотранспортних артерій у межах міст.

Аналіз вмісту забруднюючих речовин в атмосфері на основі супутникових даних за останні роки дозволив охопити всі райони та чіткіше окреслити межі найбільш забруднених територій (рис. 3.18—3.21). З огляду на те, що дані супутника Sentinel-5P надходять лише з другої половини 2018 року, а 24 лютого 2022 року розпочалася повномасштабна воєнна агресія РФ проти України, маємо лише три повні роки деталізованих супутникових спостережень (2019—2021 роки), за якими можна охарактеризувати фактичний стан забруднення атмосферного повітря в Україні. Втім, цих трьох років цілком достатньо для того, щоб оцінити наслідки дії основних джерел викидів на якість атмосферного повітря, виокремити ключові процеси, які впливають на неї, та охарактеризувати просторово-часові зміни забруднення.

Загалом на території України є як окремі міста з високим рівнем забруднення, так і сукупність таких міст, що формують окремі забруднені райони (рис. 3.18—3.21). Насамперед вирізняється Донецька область. Незважаючи на воєнні дії, що тривають з 2014 року, та окупацію частини області, вміст основних забруднюючих речовин залишається високим, причому по обидві боки від лінії розмежування. На окупованій території Донецької області до 2021 року фіксувалася активна діяльність підприємств, на відміну від окупованої частини Луганської області, де осередків зі значними викидами забруднюючих речовин практично не спостерігалося. Це є вагомим аргументом, який свідчить про більший занепад виробництва в Луганській області порівняно з Донецькою. На території, підконтрольній Україні, промислова активність продовжувалася, що часто приводило до формування високих значень загального вмісту забруднюючих речовин в атмосферно-

му повітрі. У великому осередку забрудненого повітря Донецькій області можна виокремити райони з більш локалізованими максимумами. Перший з них спостерігається поблизу Донецька та охоплює підконтрольну частину поблизу Курахівської ТЕС, непідконтрольні Харцизьк, Новий Світ (де розташована Старобешівська ТЕС) та деякі інші промислові міста. Другий осередок формується в районі міст Краматорськ і Слов'янськ. Третій осередок до початку великомасштабних бойових дій у лютому 2022 року був пов'язаний з роботою підприємств Маріуполя та забрудненням вздовж берегової лінії Азовського моря. За умови східного та південно-східного вітру поле забруднення у Донецькій і Луганській областях може трансформуватися під впливом транскордонного перенесення з міст Ростов-на-Дону і Таганрог (РФ).

Другий регіон з високими рівнями забруднення знаходиться поблизу р. Дніпро та Каховського водосховища, охоплюючи міста Кам'янське, Дніпро, Запоріжжя, Нікополь, Марганець, Енергодар. До нього можна віднести також Кривий Ріг, який хоч і розташований західніше, але забруднення від нього часто переносяться до району Каховського водосховища, підсилюючи локально сформоване забруднення. Таким чином утворюється один великий осередок підвищеного вмісту забруднюючих речовин. Ще далі на північ розташовані Горішні Плавні, Кременчук та Світловодськ з досить потужними викидами. Загалом усі названі міста можна розглядати як єдиний забруднений регіон центральної частини території України, що простягається вздовж р. Дніпро.

У Харківській області викиди від Зміївської ТЕС у смт Слобожанське та безпосередньо від Харкова, формують третій район підвищеного вмісту забруднюючих речовин. І хоча просторові масштаби цього осередку нижчі, а рівні забруднення менші, він чітко вирізняється на фоні навколишніх територій.

На півночі України осередок забрудненого повітря локалізується в м. Київ, що пов'язано насамперед з надзвичайно потужними викидами від автотранспорту, більшими навіть за викиди від столичних промислових підприємств. На південь від Києва у м. Українка розташована Трипільська ТЕС. Разом ці два міста формують фактично постійний осередок високого вмісту забруднюючих речовин, зіставний в останні роки за загальним вмістом хімічних складових з Донецькою областю.

На заході України викиди від Бурштинської і Добротвірської ТЕС, а також час від часу від Львова і Калуша визначають поле забруднення цієї частини території України, залежно від напрямку перенесення викидів. Слід зазначити, що над усією західною частиною території України часто спостерігається транскордонне перенесення забруднення, переважно з Польщі. Далі ми покажемо, наскільки велику роль відіграє забруднення інших європейських країн у формуванні хімічного складу атмосферного повітря регіону.

Що ж до інших потужних джерел викидів, великих міст та осередків високого вмісту забруднюючих речовин в атмосферному повітрі, то їх навряд чи можна об'єднати у подібного роду райони. Вплив таких осередків значний, але тільки на локальному рівні. Сюди можна віднести викиди всіх обласних центрів та м. Ладижин з Ладижинською ТЕС.

Що стосується районів з найчистішим атмосферним повітрям, то найменші рівні очікувано спостерігаються в гірських районах — Карпатських та Кримських горах. Для більшості хімічних складових загальний вміст в атмосфері тут суттєво нижчий навіть за фоновий вміст на інших територіях. Окремо слід відзначити території на Поліссі, зокрема північ Житомирської та Чернігівської областей; заповідні території Подільської височини (наприклад, природний заповідник «Медобори»); захід Кіровоградщини та південь Херсонщини. У цих районах вміст забруднюючих речовин загалом низький, проте для окремих хімічних складових можуть бути винятки, що спричинено переважно умовами перенесення атмосферного повітря.

Незважаючи на посилення ролі викидів автотранспорту, загальний вміст NO_2 у тропосфері в 2019—2021 роках перевищував $5{,}0 \cdot 10^{-5}$ моль/м^2, передусім у таких промислових містах, як Курахове, Новий Світ, Донецьк, Світлодарськ, Слов'янськ, Краматорськ, Бурштин та Добротвір (рис. 3.18). Накладання впливу автотранспорту на забруднення NO_2 спостерігається у містах Київ, Дніпро та Харків. Загальний фон неоднорідний для всієї території України. На більшій її частині фоновими значеннями можна вважати вміст NO_2 близько $4{,}0 \cdot 10^{-5}$ моль/м^2, а у районах більш віддалених від промислових міст та обласних центрів — $3{,}0 \cdot 10^{-5}$ моль/м^2. Більш чистими є такі райони, як північ Житомирської, Чернігівської та Сумської областей, північ та південь Одеської області, південь Херсонської області, центральна та західна частина Кіровоградської області, більша частина території Миколаївської області та АР Крим, на відстанях не менш як 50 км від великих міст. Абсолютні мінімуми середніх концентрацій спостерігаються в Карпатських та Кримських горах.

Загальний вміст CO в атмосфері характеризується більш однорідним просторовим розподілом порівняно з NO_2. Причиною такої однорідності є набагато довший час існування CO в атмосфері. Якщо NO_2 існує від кількох годин до приблизно доби залежно від сезону року, то CO перебуває в атмосфері протягом кількох місяців. У результаті довшого існування CO в атмосфері він поступово накопичується та більш-менш рівномірно розподіляється у просторі. Над територією України середні значення CO варіюють незначно від 0,030 до 0,036 моль/м^2 (рис. 3.19). Максимуми просторового розподілу спостерігаються лише на локальному рівні в районі потужних викидів, переважно від спалювання твердого палива на промислових підприємствах. Такими містами на території України є Маріуполь,

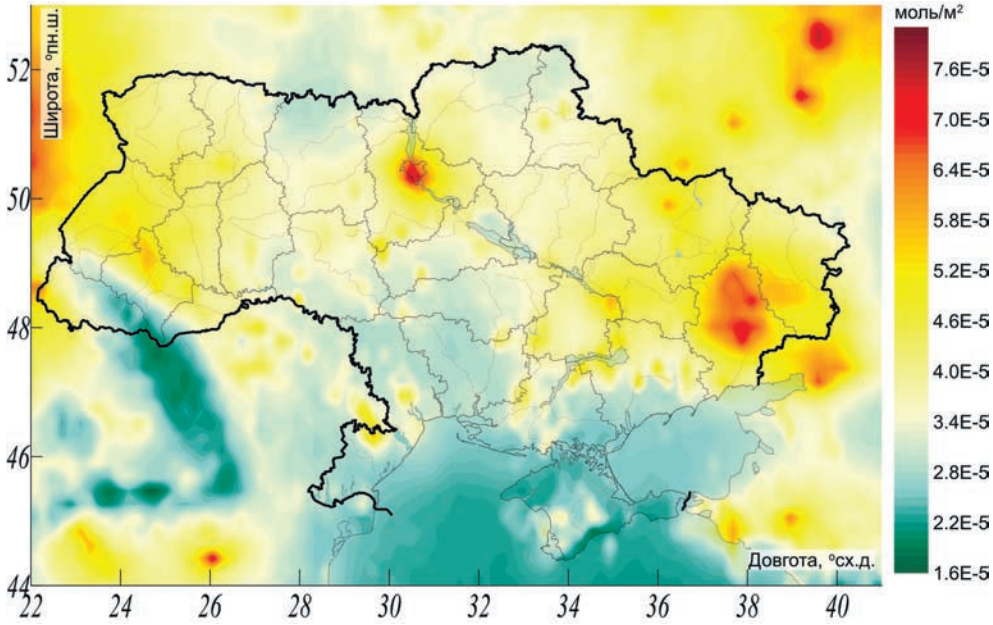


Рис. 3.18. Просторовий розподіл середніх значень загального вмісту NO_2 у тропосфері за період 2019—2021 рр.

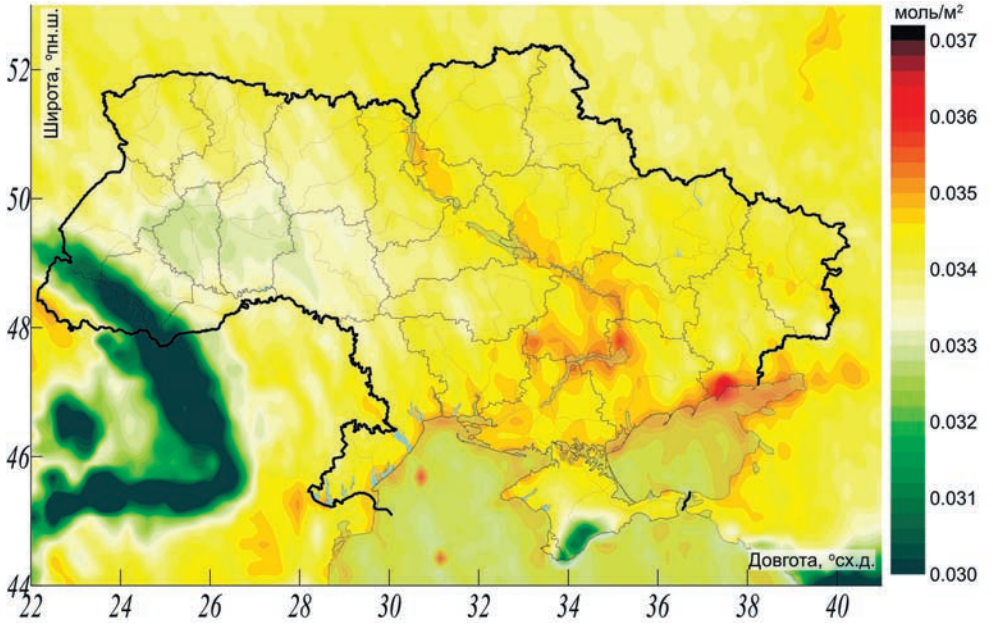


Рис. 3.19. Просторовий розподіл середніх значень загального вмісту CO в атмосфері за період 2019—2021 рр.

Дніпро, Запоріжжя, Кривий Ріг, а також весь район над осередком Марганець — Нікополь — Енергодар. Найвищий вміст CO в атмосфері на території України спостерігався в Маріуполі до того, як на початку 2022 року під час бойових дій було знищено всі промислові підприємства. Меншою мірою виокремлюються на загальному фоні такі райони, як на захід від ліній Київ — Українка та Горішні Плавні — Кременчук — Світловодськ. Для цих міст чітких осередків немає, а підвищені концентрації зміщені на захід за переважаючим перенесенням повітряних мас. Значно забрудненою CO є берегова лінія, що пов'язано з викидами від морських суден та катерів. Причому помітний внесок роблять не лише вантажні кораблі, а й, як було показано у статті [38], хаотичний неконтрольований рух туристичних катерів в період з травня по вересень включно. Фонові значення на території України сягають 0,034 моль/м^2. Менший вміст CO спостерігається тільки у трьох районах: Подільська височина із загальним вмістом близько 0,033 моль/м^2, Кримські гори — 0,031 моль/м^2 та Українські Карпати — близько 0,030 моль/м^2.

Просторовий розподіл загального вмісту формальдегіду, який можна оцінити з використанням супутникових даних, більшою мірою відображає наслідки глобального розподілу, ніж наслідки викидів у містах на території України (рис. 3.20). Точність визначення CH_2O супутниковими приладами є недостатньо задовільною, щоб чітко виявляти локальні осередки. Як наслідок, на території України ми спостерігаємо більш якісні особливості розподілу, сформовані великомасштабним перенесенням та сукупним впливом найпотужніших джерел викидів у масштабах півкулі разом із процесами окиснення метану та вторинним утворенням CH_2O внаслідок фотохімічного розкладу алкенів [54, 55]. Так, загальний вміст CH_2O у тропосфері зростає в напрямку з півночі на південь, при цьому фоновий вміст змінюється приблизно з $7{,}5\cdot10^{-5}$ моль/м^2 на півночі території України до $9{,}0\cdot10^{-5}$ моль/м^2 в Одеській, Миколаївській, Херсонській, Запорізькій областях та АР Крим. Водночас можна простежити наслідки викидів таких міст, як Київ, Українка, Дніпро, Запоріжжя та ін. Зазвичай загальний вміст CH_2O у цих містах на 20—30 % перевищує фонові значення, тоді як мінімуми простежуються чіткіше, зокрема у Карпатах, на заповідних територіях Подільської височини і поблизу Шацьких озер. Загальний вміст CH_2O тут може бути в межах $5{,}0—6{,}0\cdot10^{-5}$ моль/м^2.

Загальний вміст SO_2 в атмосфері над територією України характеризується максимом просторового розподілу над містами, в яких є великі ТЕС та потужні промислові підприємства, що працюють на твердому паливі. Як наслідок, масштабний осередок високого вмісту SO_2 охоплює майже всю Донецьку область із середніми значеннями, вищими за $3{,}5\cdot10^{-4}$ моль/м^2 (рис. 3.21). Високий вміст SO_2 спостерігається також над трьома ТЕС: Бурштинською, Добротвірською та Зміївською (смт Слобожанське). Фо-

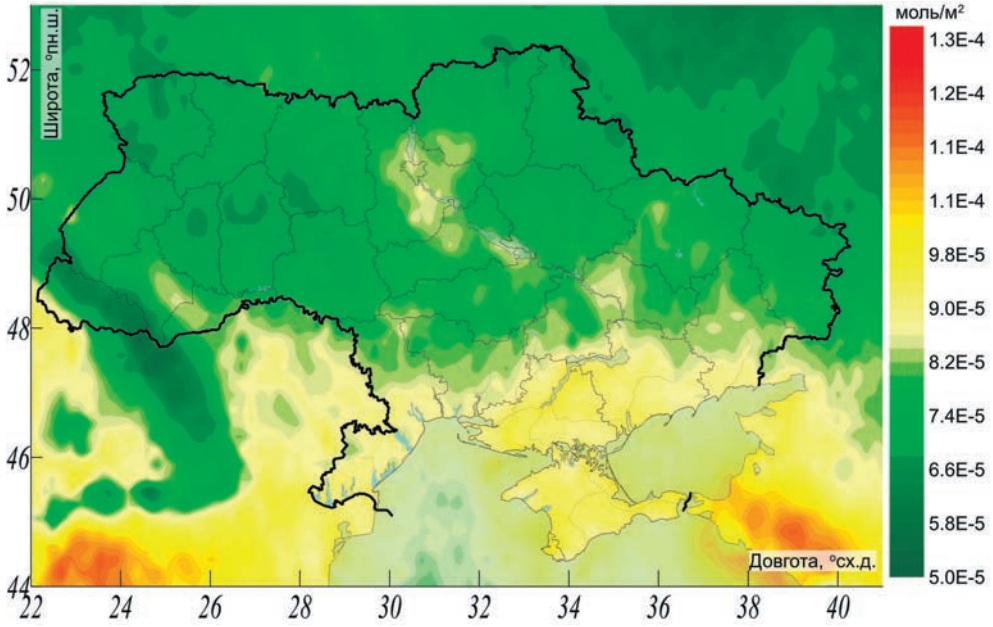


Рис. 3.20. Просторовий розподіл середніх значень загального вмісту CH_2O у тропосфері за період 2019—2021 рр.

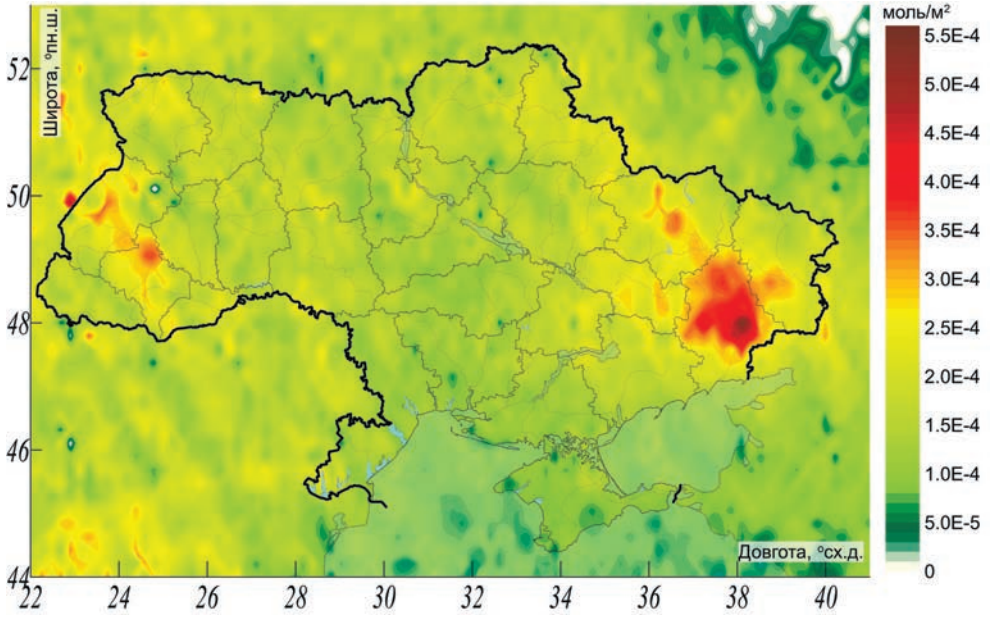


Рис. 3.21. Просторовий розподіл середніх значень загального вмісту SO_2 в атмосфері за період 2019—2021 рр.

нові значення загального вмісту SO_2 в атмосфері становлять близько $1{,}0—1{,}5 \cdot 10^{-4}$ моль/м^2.

На рис. 3.22 наведено діаграму розмаху, побудовану для періоду 2019—2021 років Для наочності обрано найбільш забруднені та найбільш чисті місця на території України, визначені для кожної із забруднюючих речовин: NO_2, CO, CH_2O і SO_2. Особливостями розподілу забруднюючих речовин у загальному стовпі атмосфери є наявність великої кількості викидів з високим вмістом за межами 95 %-го процентиля. Більше того, для всіх речовин крім CO у стовпі атмосфери спостерігається позитивна асиметрія розподілу, причиною появи якої є значна повторюваність днів з невисокими концентраціями. Часто вони у вихідних супутникових даних є від'ємними. Зрозуміло, що концентрація не може бути від'ємною, проте через значні похибки зондування дуже малий вміст складових може відображатися як негативні значення. В такому разі, якщо надійність показника підтверджена високим QA, рекомендовано вважати, що вміст є низьким. При обробленні даних негативним значенням надають близькі до нуля позитивні значення на рівні фонового вмісту найбільш чистих районів. Як результат, утворюється позитивна асиметрія, яка могла б мати менш виражений характер, якби супутникові дані мали вищу точність (але позитивна асиметрія у будь-якому разі була б).

NO_2 у забруднених містах варіює переважно від $3{,}0 \cdot 10^{-5}$ до $8{,}0 \cdot 10^{-5}$ моль/м^2 (25 %-й і 75 %-й процентилі відповідно), а в Києві — до $9{,}0 \cdot 10^{-5}$ моль/м^2 (рис. 3.22). Медіанні значення перебувають на рівні $5{,}0 \cdot 10^{-5}$ моль/м^2. При цьому в найбільш забруднених містах часто спостерігаються перевищення значень до $1{,}2—1{,}7 \cdot 10^{-4}$ моль/м^2, що вдвічі перевищує середній вміст NO_2 у найбільш забруднених районах та у 4—7 разів — середній фоновий вміст. Для районів з найменшим вмістом NO_2 характерний значно менший розкид значень порівняно із забрудненими територіями. 75 % значень вмісту NO_2 не перевищує 25 %-й процентиль забруднених міст, а 95 % значень не перевищують їх середні показники (рис. 3.22). Проте навіть для гірських районів України можуть спостерігатися випадки, коли вміст NO_2 досягає екстремальних $1{,}0 \cdot 10^{-4}$ моль/м^2. Ці випадки спричинені перенесенням забрудненого повітря з промислових районів (інколи й інших держав) за умов низьких висот граничного шару атмосфери (ГША), сприятливих до накопичення забруднення у нижніх шарах атмосфери.

Загальний вміст SO_2 в атмосфері за даними супутникових спостережень добре використовувати для визначення високих рівнів забруднення. Водночас залишається технічно проблематичним аналізувати низькі концентрації та загальний розподіл значень, що часто опиняються в області від'ємних показників. Саме тому діаграма розмаху для чистих районів території України (рис. 3.22) виглядає дещо дивно з розташуванням медіани поруч із 25 %-м процентилем близько нуля та відсутністю «вусів» у бік

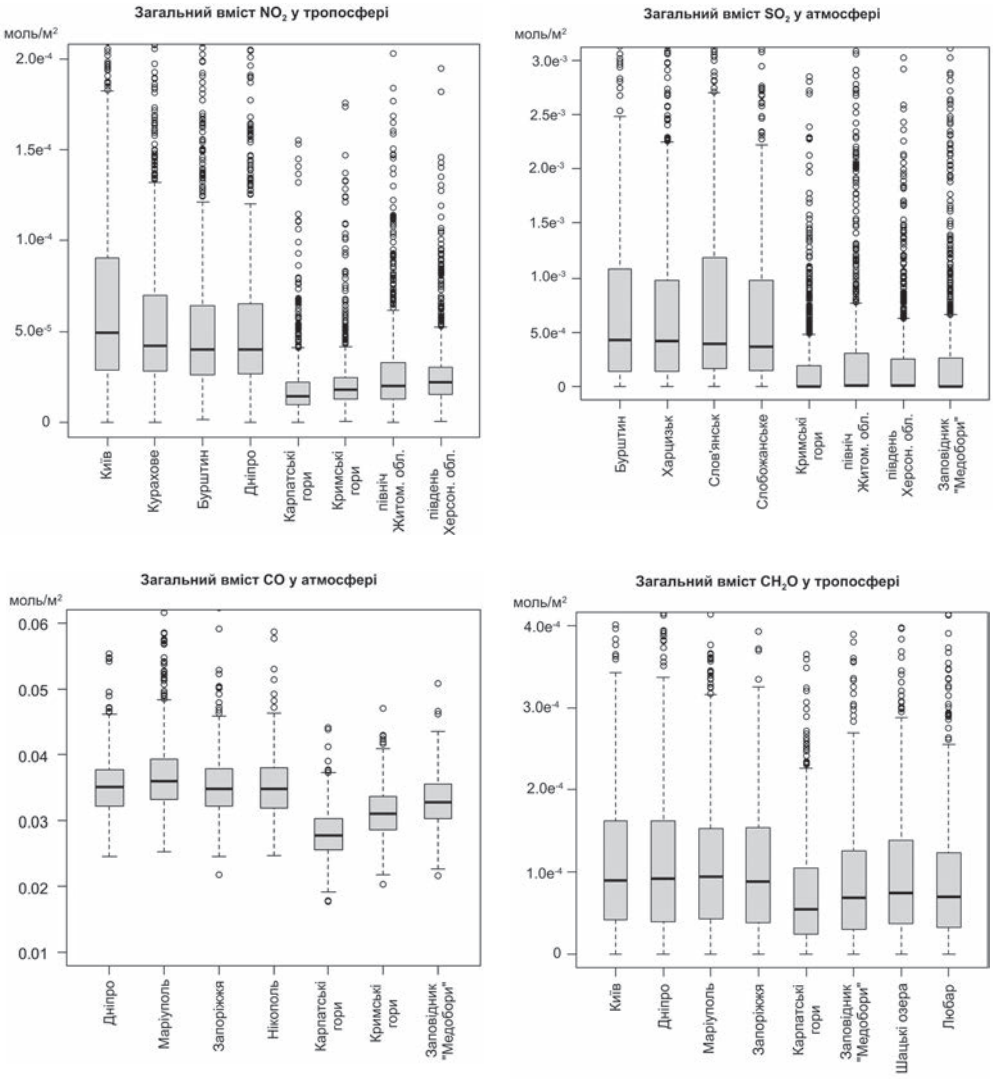


Рис. 3.22. Діаграма розмаху загального вмісту хімічних складових атмосферного повітря з найбільшими та найменшими значеннями на території України за період 2019—2021 рр.

низьких значень. Проте, розуміємо, що йдеться про досить низькі концентрації SO_2, часто навіть менші, ніж дозволяє визначити сенсор з такою чутливістю. Зрештою, маємо уявлення про розподіл високих значень вмісту SO_2. Так, 75 %-й процентиль дорівнює $2{,}0—3{,}0 \cdot 10^{-4}$ моль/м^2, тобто переважна більшість значень у чистих районах не досягає звичних рівнів у промислово забруднених містах. Час від часу спостерігаються досить високі

значення, вищі за $1{,}0 \cdot 10^{-3}$ моль/м^2 в результаті перенесення із забруднених районів. Такі показники навіть для міст з промисловістю на твердому паливі є досить високими та перевищують вихід за +1σ. Найбільш забрудненими SO_2 зонами є міста та райони поблизу Бурштина, Харцизька, Слов'янська та Слобожанського, де показники зазвичай варіюють у межах від $3{,}0 \cdot 10^{-4}$ до $1{,}0 \cdot 10^{-3}$ моль/м^2. 95 %-й процентиль перебуває на рівні $2{,}3—2{,}5 \cdot 10^{-3}$ моль/м^2.

Найменш варіативним із розглянутих забруднюючих речовин є CO. У найбільш забруднених містах основна частина значень варіює в межах 0,032—0,037 моль/м^2, тоді як у чистих районах — від 0,028 до 0,033 моль/м^2 (рис. 3.22). Загальний вміст CO в атмосфері вкрай рідко буває нижче 0,022 моль/м^2 (у високогірних районах), та зростає вище 0,050 моль/м^2 у найбільш забруднених містах. Мала варіативність вмісту CO при розгляді у стовпі атмосфери, яка пов'язана з відносно тривалим часом існування домішки, призводить до недостатньої чутливості визначення осередків з високими значеннями, що сформувалися у приземному шарі в багатьох містах. Проте екстремальні перевищення виявляються дуже чітко на однорідному фоні, особливо в разі лісових пожеж.

Досить незначна відмінність спостерігається між забрудненими та чистими районами для загального вмісту CH_2O у тропосфері (рис. 3.22). Ті значення у стовпі атмосфери, які надають супутникові спостереження, більшою мірою сформовані великомасштабними процесами перенесення забруднення. У глобальному масштабі осередками високого вмісту CH_2O є тропічні ліси з їхніми численними лісовими пожежами, що спричиняють викиди CH_2O, та інтенсивними процесами окиснення метану. Над промисловими районами всіх країн також спостерігається незначне зростання CH_2O у вертикальному стовпі (слід зауважити, що йдеться саме про закономірності вмісту у вертикальному стовпі, а не про забруднення в приземному шарі, яке за супутниковими даними неможливо відділити від загального вмісту). Ось ці джерела та перенесення забруднених повітряних мас від них і визначають загалом те, що ми спостерігаємо для загального вмісту CH_2O. На цьому фоні роль локальних джерел викидів в Україні є досить незначною, що й зумовлює подібність діаграм розмаху для забруднених і чистих районів. Маємо варіативність загального вмісту CH_2O переважно в межах від $5{,}0 \cdot 10^{-5}$ моль/м^2 до $1{,}7 \cdot 10^{-4}$ моль/м^2. Дуже часто різниці між найбільш забрудненими та найбільш чистими районами є незначними, на рівні 10—20 %.

Досліджувані забруднюючі речовини в атмосфері характеризуються добре вираженою сезонною мінливістю (рис. 3.23—3.26), особливо в містах та промислово навантажених районах, що свідчить про значущу роль антропогенної діяльності у формування забруднення на території України. Якщо розглядати забруднення в атмосферному стовпі, його сезонна мін-

ливість з певних фізичних причин відрізняється від сезонної мінливості у приземному шарі. Детальніше про це йдеться у підрозділі 3.3, де розглядається порівняння наземних та супутникових даних. Тут ми лише акцентуємо увагу на сезонній мінливості забруднюючих речовин, розподілених у вертикальному стовпі атмосфери.

Загальний вміст NO_2 у тропосфері характеризується зимовими максимумами та літніми мінімумами (рис. 3.23), що більш чітко проявляється у містах, ніж у чистих районах. Зимове зростання NO_2 у тропосфері пов'язане з двома чинниками. Перший — зростання викидів NO_x спричинене більш інтенсивним використанням палива під час опалювального сезону. Другий чинник — зменшення інтенсивності процесів хімічного виведення NO_2 з атмосфери за нижчих температур, в результаті чого час існування домішки значно зростає (з кількох годин до приблизно однієї доби). Обидва фактори впливають на накопичення NO_2 в атмосферному повітрі. Є ще й третій ситуативний чинник, пов'язаний з частішою повторюваністю температурних інверсій та загалом нижчими висотами ГША, що створює додаткові умови до накопичення забруднюючих речовин. У найбільш забруднених містах загальний вміст NO_2 взимку перевищує $8{,}5\cdot10^{-5}$ моль/м^2, тоді як влітку наближається до фонових значень на рівні $4{,}5\cdot10^{-5}$ моль/м^2. У чистих районах різниця набагато менша, а середні значення за рік коливаються від $2{,}0\cdot10^{-5}$ моль/м^2 влітку до $4{,}0\cdot10^{-5}$ моль/м^2 взимку.

Загальний вміст SO_2 в атмосфері має подібну до NO_2 сезонну мінливість з визначальною антропогенною роллю під час опалювального сезону (рис. 3.24). Зростання викидів SO_2 відбувається внаслідок використання твердого палива. І хоча тверде паливо використовують не завжди, у зимовий сезон вся територія України характеризується вищим вмістом SO_2 через його перенесення та поширення від тих джерел викидів, де тверде паливо є основним. Якщо у літні місяці середні значення загального вмісту SO_2 в атмосфері незалежно від території не перевищує $5{,}2\cdot10^{-4}$ моль/м^2, то взимку він зростає більш ніж удвічі, до $2{,}0\cdot10^{-3}$ моль/м^2 над чистими районами і до $3{,}0\cdot10^{-3}$ моль/м^2 у містах, у яких ТЕС працюють на твердому паливі.

Якщо поглянути на річний хід загального вмісту CO в атмосфері, то він відрізняється від SO_2 та NO_2 (рис. 3.25). Дивлячись на графік, важко повірити, але формування такого річного ходу також багато в чому залежить від зростання викидів в опалювальний сезон, так само, як і для SO_2 та NO_2. Проте хімічні властивості CO сприяють тому, що максимальні значення спостерігаються не в січні, а наприкінці опалювального періоду (а якщо точніше, то навіть у квітні через ще одну типову для України та нетипову для багатьох країн Європи особливість, про що йтиметься далі). Загальний вміст CO в атмосфері починає зростати відразу після початку опалювального сезону в листопаді, від 0,028—0,030 моль/м^2 в чистих районах та

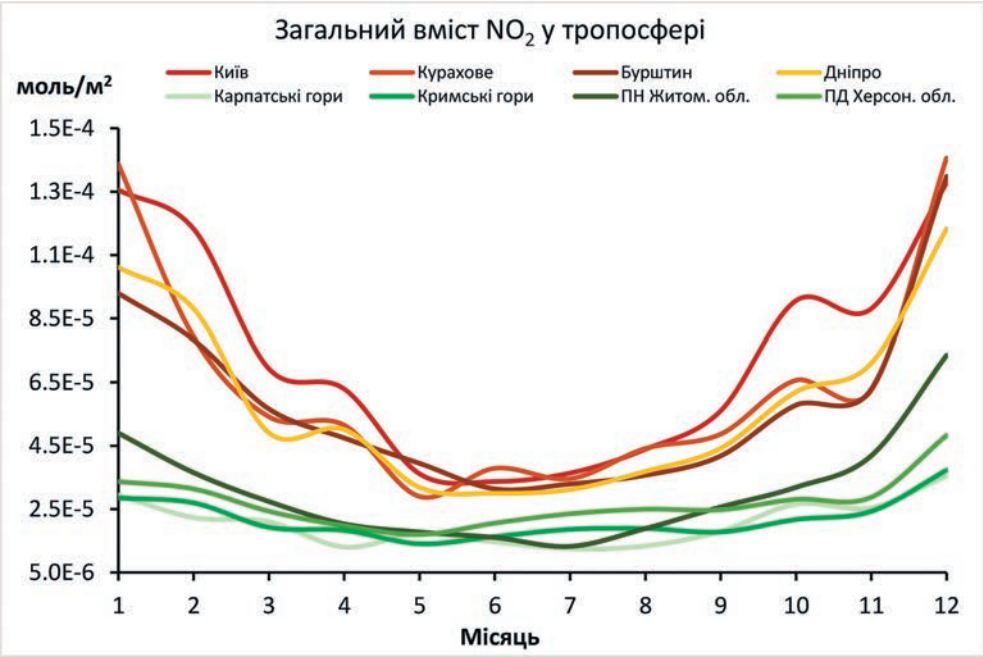


Рис. 3.23. Річний хід загального вмісту NO_2 у тропосфері з найбільшими та найменшими значеннями на території України

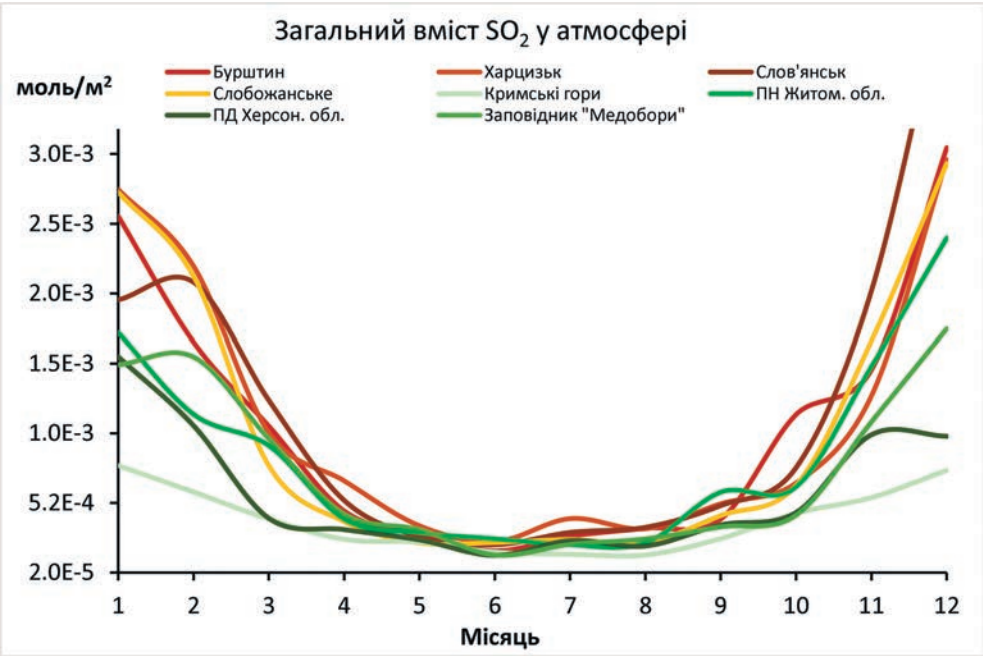


Рис. 3.24. Річний хід загального вмісту SO_2 в атмосфері з найбільшими та найменшими значеннями на території України

від 0,032—0,034 моль/м^2 у найбільш забруднених містах до щонайменше на 7—10 % вищих значень уже у грудні. Через те, що час існування CO в атмосфері становить місяці (а не години і дні, як для NO_2 та SO_2 відповідно), відбувається його накопичення в атмосфері внаслідок зростання викидів від підприємств, що працюють на твердому паливі. Виведення CO відбувається вкрай повільно, адже за низьких температур та незначної кількості сонячного випромінювання практично припиняється процес виведення через реакції з радикалом OH. Поступово загальний вміст CO зростає і в березні, із завершенням опалювального сезону в Україні та різким зростанням інтенсивності сонячного випромінювання, він мав би різко зменшуватися, як це спостерігається в переважній більшості європейських країн. Проте в Україні з березня розпочинається сезон активного спалювання сухостою на полях [56]. Звісно, серед основних речовин, які викидаються внаслідок горіння біомаси, є CO, вміст якого починає стрімко зростати, що призводить до формування у квітні максимумів, які можуть досягати 0,040 моль/м^2. Так триває, допоки не завершиться сезон спалювання сухостою на полях. Саме цими процесами зумовлено зміщення максимумів з кінця зими — початку весни на середину весни. Після завершення сезону спалювання відходів сільськогосподарського виробництва, провідну роль починають відігравати природні процеси виведення CO з атмосфери та незначні (порівняно із зимовим періодом) викиди CO. Найбільша інтенсивність виведення CO через реакції з радикалами OH спостерігається у червні—липні. Однак уже у вересні формується вторинний максимум CO, знову пов'язаний зі спалюванням рослинних решток.

Серед усіх розглянутих забруднюючих речовин лише CH_2O має літні максимуми річного ходу, досягаючи $1{,}4\cdot10^{-4}$ моль/м^2 в чистих районах та $2{,}1\cdot10^{-4}$ моль/м^2 у промислових містах (рис. 3.26). Викиди від промисловості та автотранспорту на території України не мають чіткого прояву сезонної мінливості загального вмісту CH_2O. Основну роль відіграють процеси фотохімічного розкладу інших речовин. Очевидно, що більш інтенсивні фотохімічні процеси на території України спостерігаються влітку за інтенсивного надходження сонячної радіації та високої температури повітря. CH_2O утворюється внаслідок розкладу метану і алкенів, та є проміжною ланкою в утворенні інших хімічних сполук, у тому числі вуглекислого газу (CO_2) та приземного озону (O_3). З листопада до квітня вміст CH_2O залишається низьким без суттєвої різниці між промисловими містами і чистими районами, на рівні від $6{,}0\cdot10^{-5}$ до $8{,}0\cdot10^{-5}$ моль/м^2.

Час від часу територія України зазнає значного впливу транскордонного перенесення забруднюючих речовин. Якщо у масштабах кількох років цей вплив не настільки чітко проявляється на фоні викидів від власних джерел, то в масштабі від днів до місяців активне транскордонне перенесення забруднення може формувати осередки підвищеного вмісту забруд-

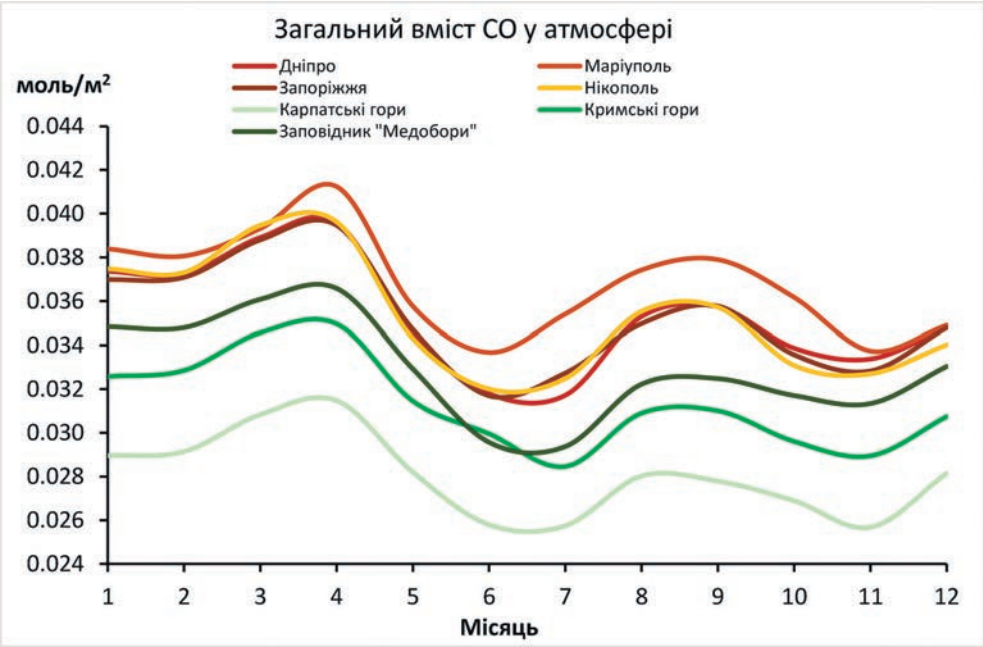


Рис. 3.25. Річний хід загального вмісту CO в атмосфері з найбільшими та найменшими значеннями на території України

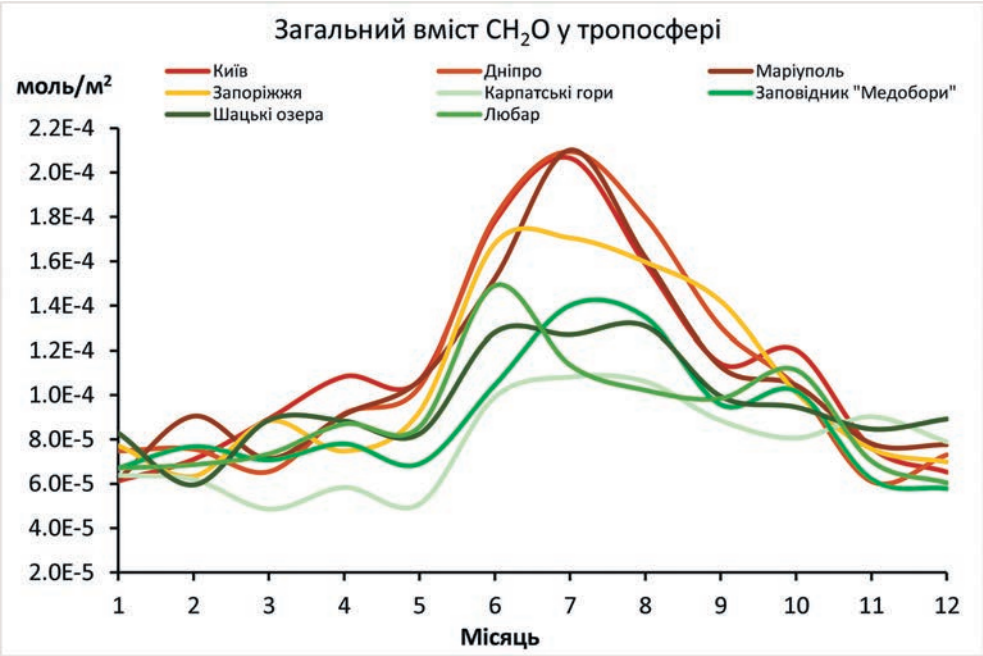


Рис. 3.26. Річний хід загального вмісту CH_2O в тропосфері з найбільшими та найменшими значеннями на території України

нюючих речовин на значній території. Як ми покажемо далі у підрозділі 3.4, повітря території України часто є менш забрудненим, ніж у багатьох європейських країнах. За інтенсивного перенесення повітряних мас (переважно західного, але інколи забруднене повітря може надходити зі сходу та з південного заходу) викиди в інших країнах переносяться на територію України. На рис. 3.27 і 3.28 наведено приклади транскордонного перенесення забруднюючих речовин, виявленого під час роботи розробленої в Українському гідрометеорологічному інституті (УкрГМІ) ДСНС України та НАН України автоматизованої системи оцінки якості атмосферного повітря на основі супутникових даних.

Вміст забруднюючих речовин, що переносяться, може бути зіставним з викидами найбільш забруднених промислових міст на території України. Внаслідок того, що хмара забруднення вже перебуває певний час в атмосферному повітрі та поступово розсіюється, на супутниковому знімку осередок виглядає «розмитим», часто розірваним на окремі нечіткі осередки, що охоплюють значну площу. Відрізнити його від викидів власних міст можна за наявністю видимого шлейфу від джерела викидів або за чіткістю осередку. Для прикладу можна порівняти на рис. 3.27 осередки поблизу міст Донецьк, Кривий Ріг чи Нікополь з осередком на південному заході території України. Однак не завжди є можливість настільки чітко виявити відмінності, тому при аналізі подібних випадків потрібно залучати метеорологічні дані щодо вітру, температури та вологості повітря, висоти ГША, а також інформацію про можливі джерела викидів на земній поверхні. Саме тому, коли супутникові дані газових хімічних складових намагаються проаналізувати та описати некомпетентні фахівці, виникають помилки та хибні висновки під час інтерпретації даних про реальну причину появи тих чи інших осередків високого вмісту забруднюючих речовин у стовпі атмосфери. Ще одним «підводним каменем» під час аналізу перенесення забруднених повітряних мас є неможливість отримати інформацію про те, на якій висоті перебуває хмара забрудненого повітря. Інколи у ЗМІ та соцмережах з'являються некомпетентні висновки про видимі максимуми високого вмісту забруднюючих речовин над певними територіями, які вдалося помітити на основі використання доступних у вільному доступі продуктів третього рівня архівації (детальніше про рівні архівації йшлося у підрозділі 3.1). При цьому хмара забруднення, яку супутник бачить зверху як осередок над певною територією, може розташовуватися на висоті, наприклад, 3 км або 5 км, або ще вище і ніяк не впливати на якість атмосферного повітря у приземному шарі. Детальний фаховий аналіз із залученням додаткових методів може допомогти встановити чи ця хмара забруднення перебуває у приземному шарі, чи на великих висотах, але ймовірність цього далеко не завжди може бути 100-відсотковою без наявності точної інформації про те, що відбувається з джерелами викидів на поверхні Землі. Тому часто супут-

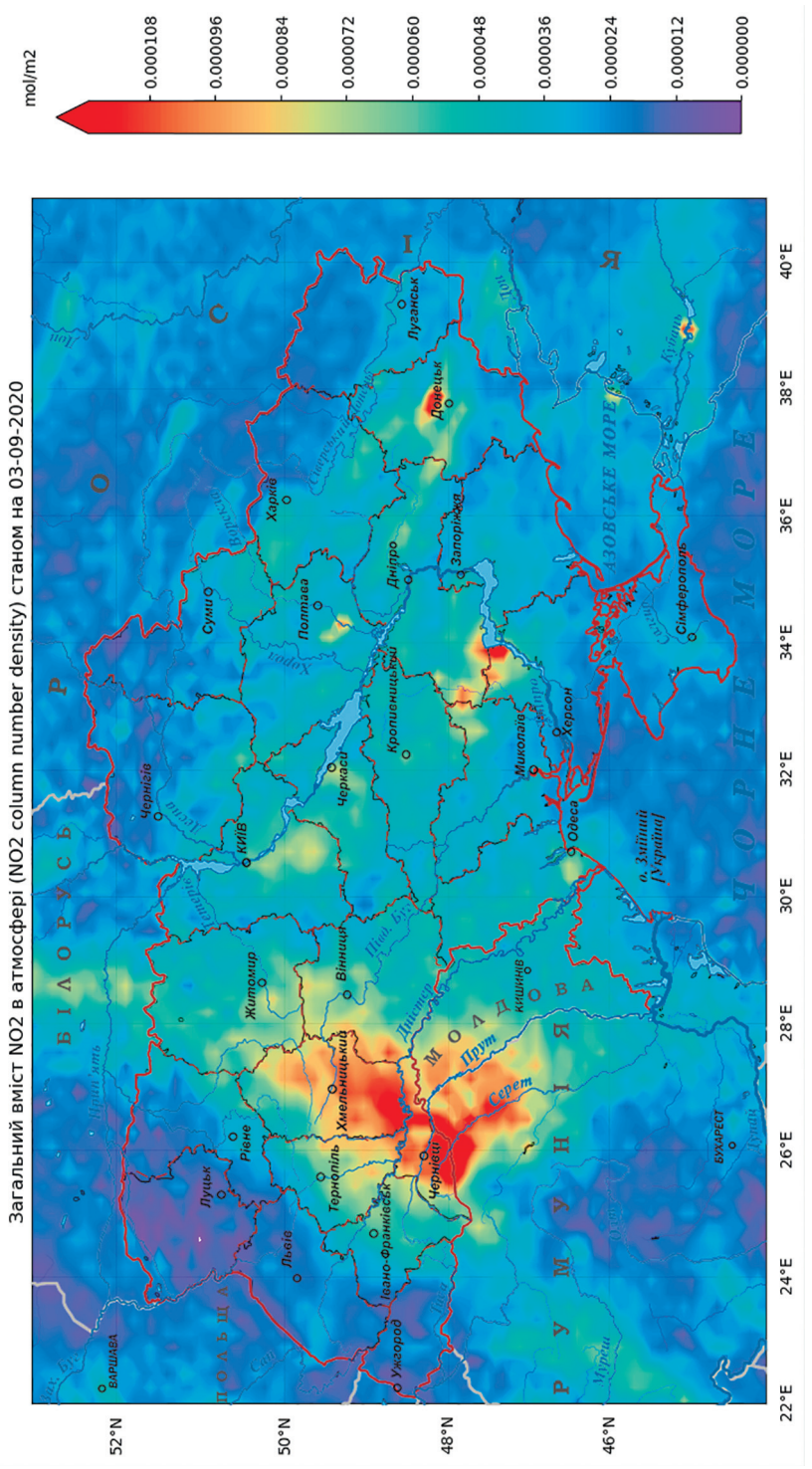


Рис. 3.27. Перенесення NO_2 з території Румунії, виявлене автоматизованою системою оцінки якості атмосферного повітря на основі супутникових даних в УкрГМІ 03.09.2020 р. (візуалізація системи)

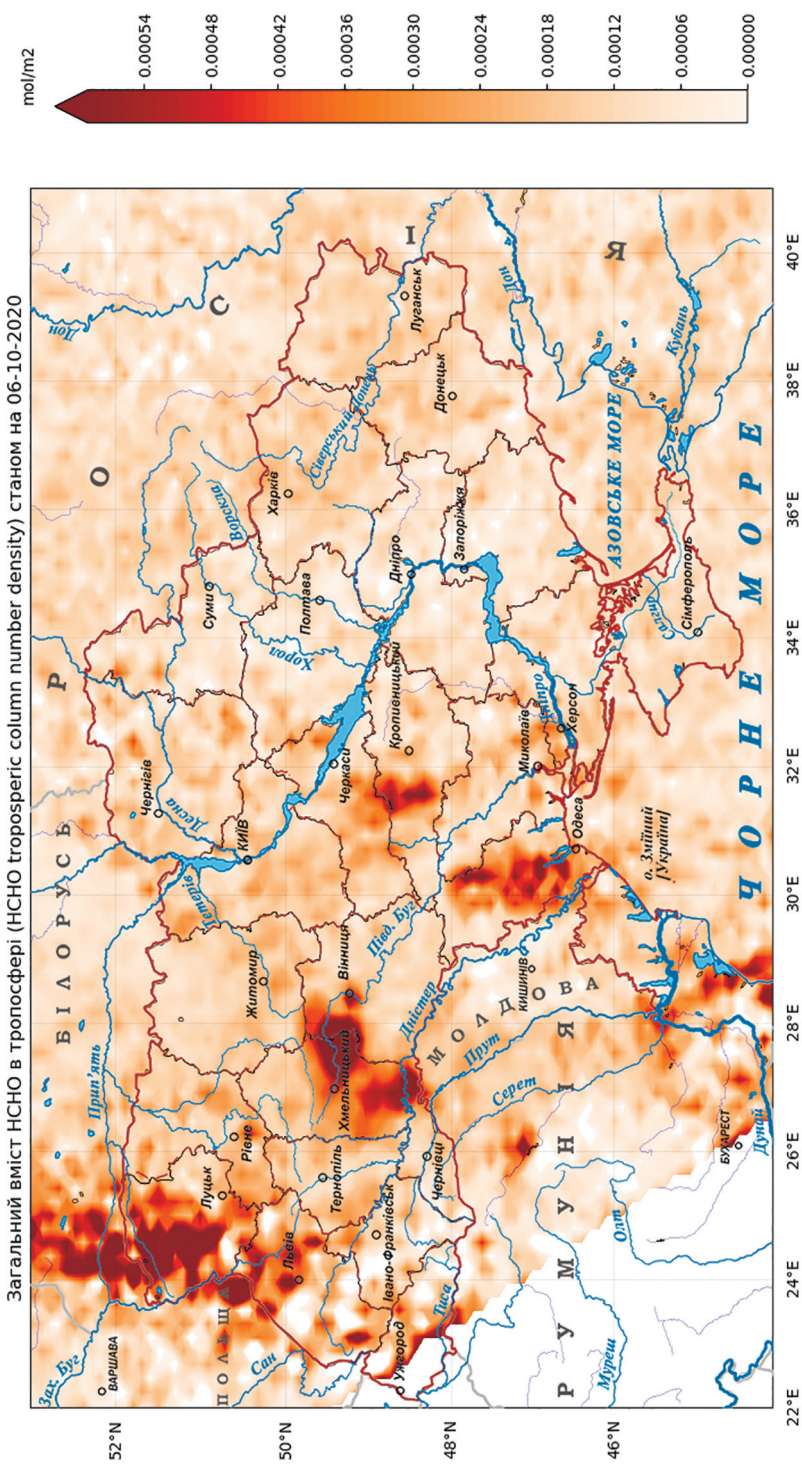


Рис. 3.28. Перенесення CH_2O з південного заходу, виявлене автоматизованою системою оцінки якості атмосферного повітря на основі супутникових даних в УкрГМІ 06.10.2020 р. (візуалізація системи)

никові дані дають змогу виявити транскордонне перенесення забрудненого повітря, але не завжди є можливість встановити фактичну висоту, на якій перебуває хмара забруднення.

Загалом більш ніж трирічне використання супутникових даних Sentinel-5P дозволило виявити чотири основних напрямки поширення забрудненого повітря з інших країн.

1. Найбільша повторюваність характерна для надходження забрудненого повітря із заходу та північного заходу, здебільшого з промислових районів Польщі. Це перенесення впливає на поле забруднення Західної України, однак інколи може досягати й центральних областей.

2. Східні області території України зазнають впливу східного перенесення з району російських міст Таганрог і Ростов-на-Дону. Викиди з цих міст можуть досягати Донецької та Луганської областей України, але надалі простежити транскордонне перенесення забрудненого повітря із сходу складно через значне надходженням промислових викидів із самих Донецької та Луганської областей.

3. Північно-східні області території України (Харківська і Сумська) зрідка опиняються під впливом надходження забруднення з території РФ від Бєлгорода, Курська та Старого Осколу.

4. Досить рідкісним є випадок, зображений на рис. 3.27, коли західні, південно-західні та південні області України опиняються під впливом забрудненого повітря, яке надходить з території Румунії.

Надходження забрудненого повітря з антропогенних джерел на території Білорусі не спостерігалося, хоча лісові пожежі в білоруському Поліссі часто стають причиною погіршення якості атмосферного повітря у північних районах Волинської, Рівненської, Житомирської та Київської областей.

Поки ми більшою мірою акцентували увагу на антропогенному забрудненні атмосферного повітря і мало згадували про інші потужні можливості використання супутникових даних щодо газових складових, зокрема про виявлення наслідків викидів у природних екосистемах. Насамперед це викиди від природних пожеж, які вдається виявляти постійно. Горіння біомаси призводить до формування значних викидів, які добре простежуються на основі даних щодо CO та NO_2, навіть за нещільної хмарності. Оскільки лісові пожежі або пожежі на полях виникають на віддалі від великих міст, їхні наслідки для атмосферного повітря, які порушують звичний «фоновий» стан, видно особливо чітко.

На рис. 3.29 і 3.30 наведено просторовий розподіл загального вмісту CO та NO_2, що спостерігався під час одних з найбільш масштабних лісових пожеж останніх років на півночі Київської та Житомирської областей у квітні 2020 року. Зазвичай вміст забруднюючих речовин поблизу району з активним горінням в рази перевищує вміст найбільш забруднених промислових міст. Пожежі, що тривають понад два тижні, роблять настільки зна-

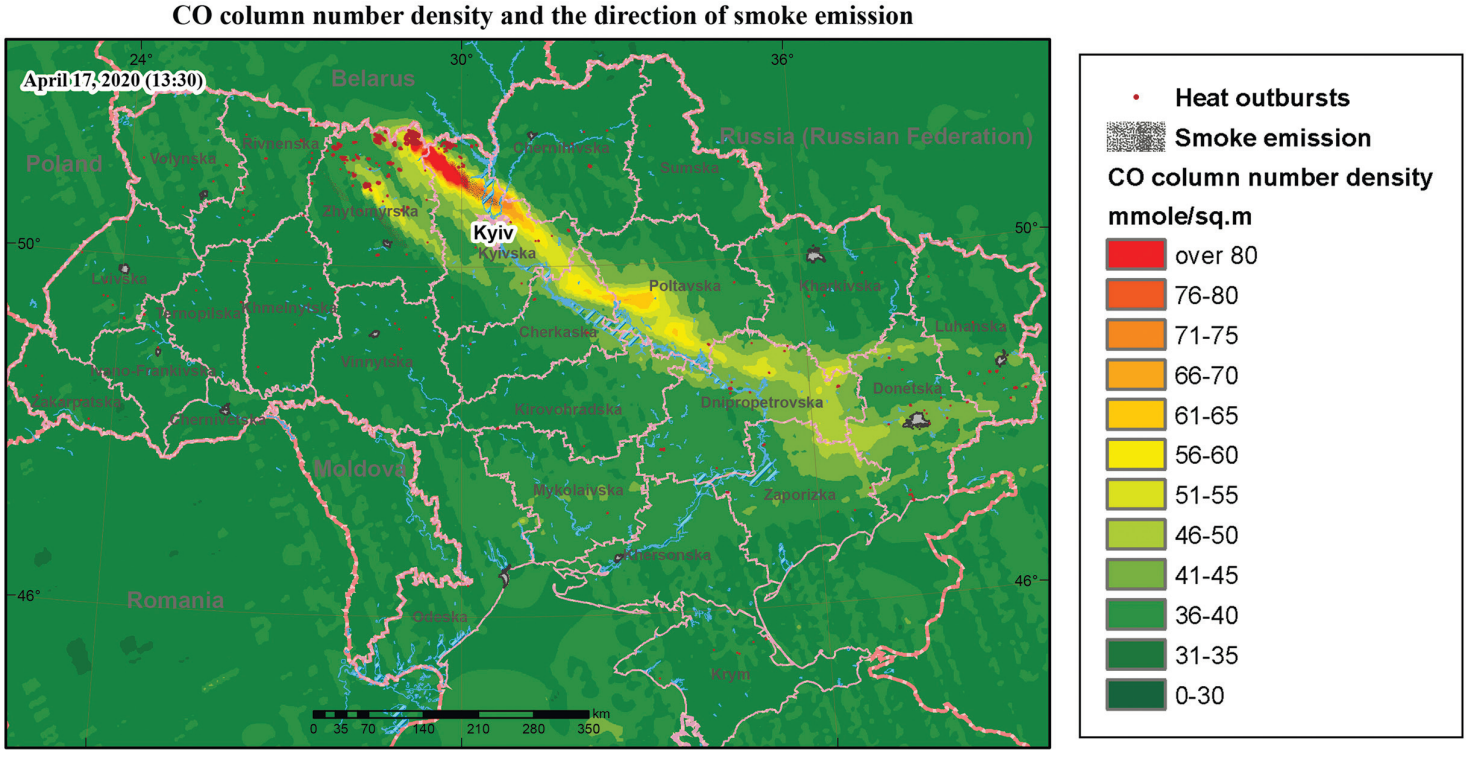


Рис. 3.29. Просторовий розподіл загального вмісту CO в атмосфері 17.04.2020 р. під час масштабних лісових пожеж на півночі України [52]

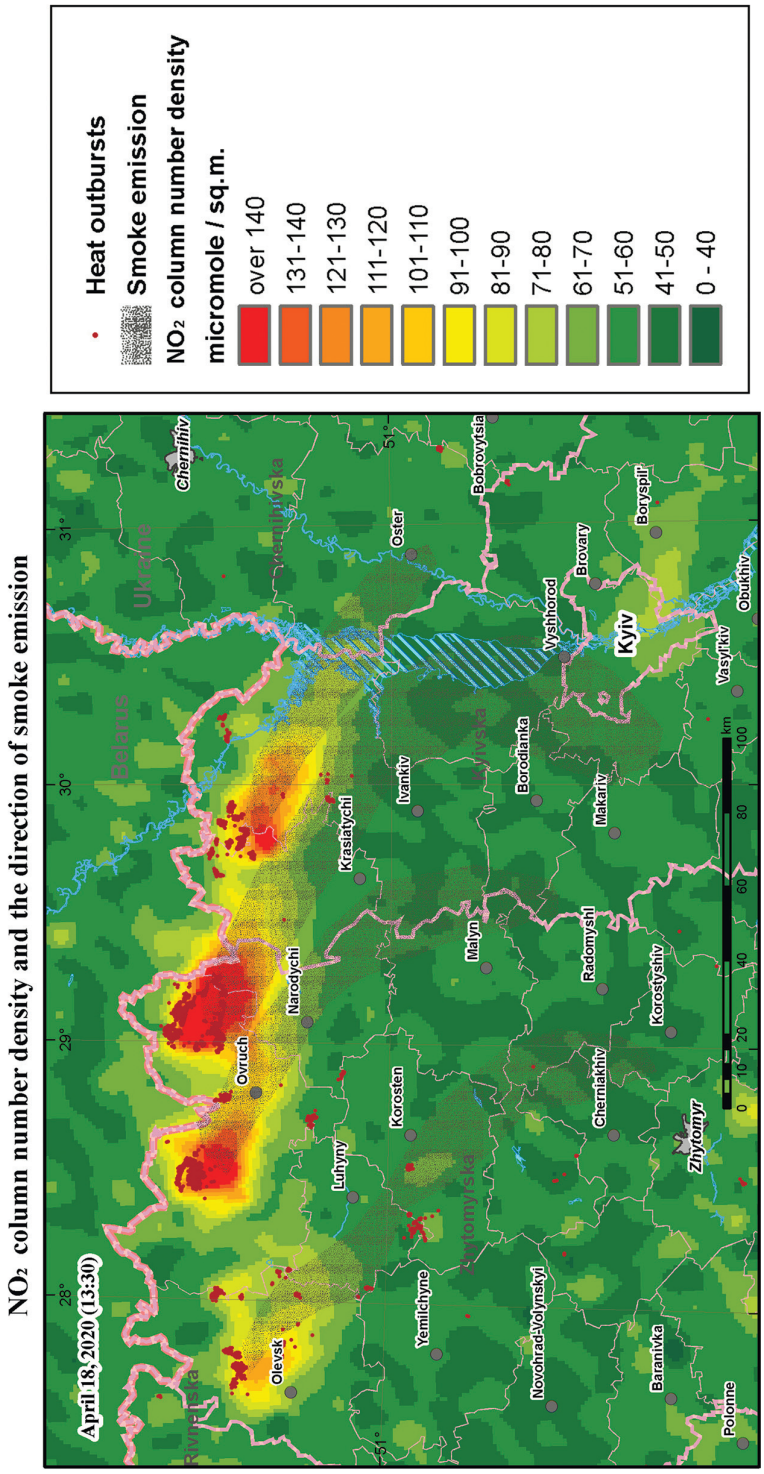


Рис. 3.30. Просторовий розподіл загального вмісту NO_2 в атмосфері 18.04.2020 р. під час масштабних лісових пожеж на півночі України [52]

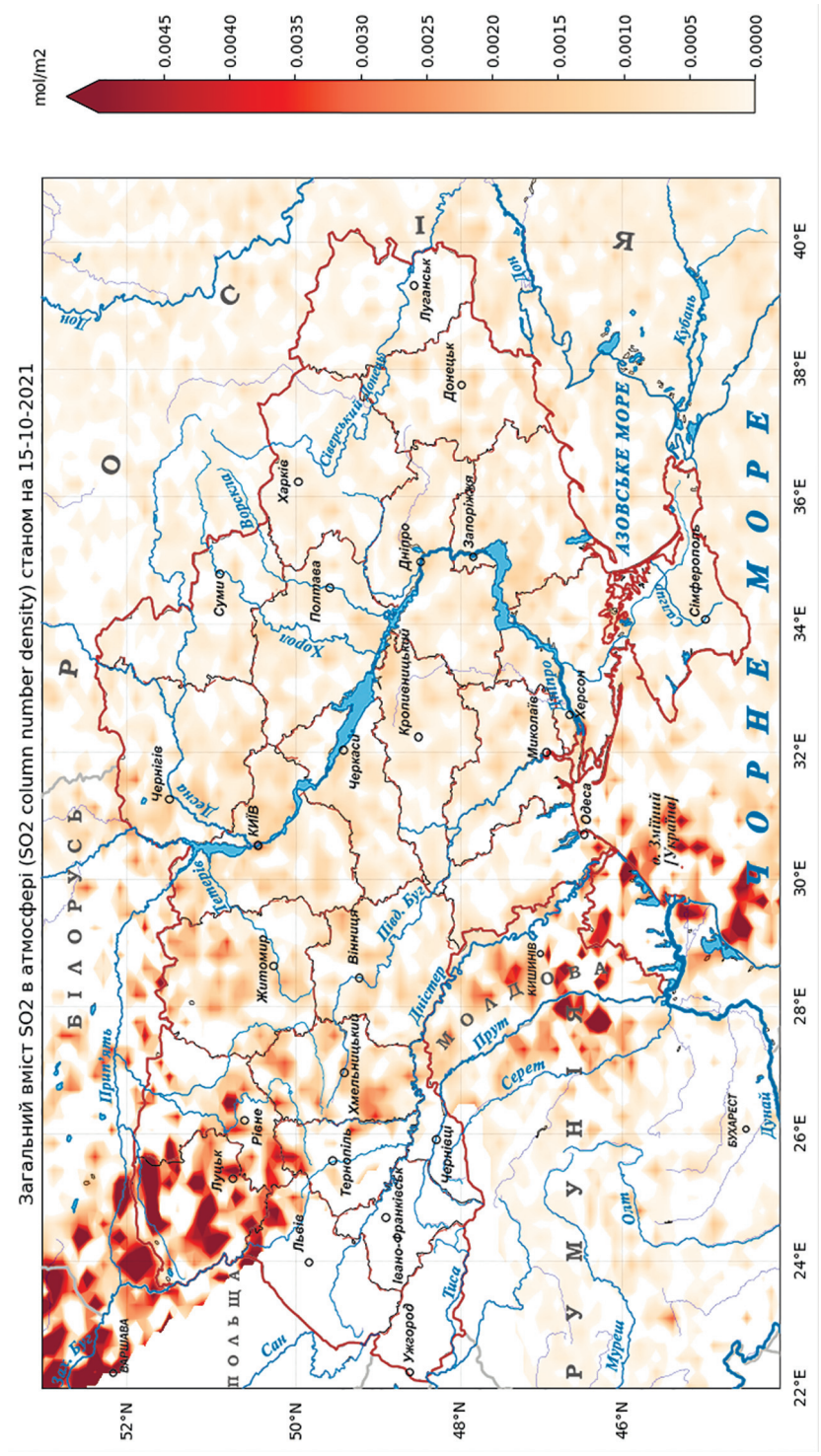


Рис. 3.31. Перенесення SO_2 в атмосфері від виверження вулкана Кумбре-В'єха на Канарських островах, виявленого автоматизованою системою оцінки якості атмосферного повітря на основі супутникових даних в УкрГМІ 15.10.2021 р. (візуалізація системи)

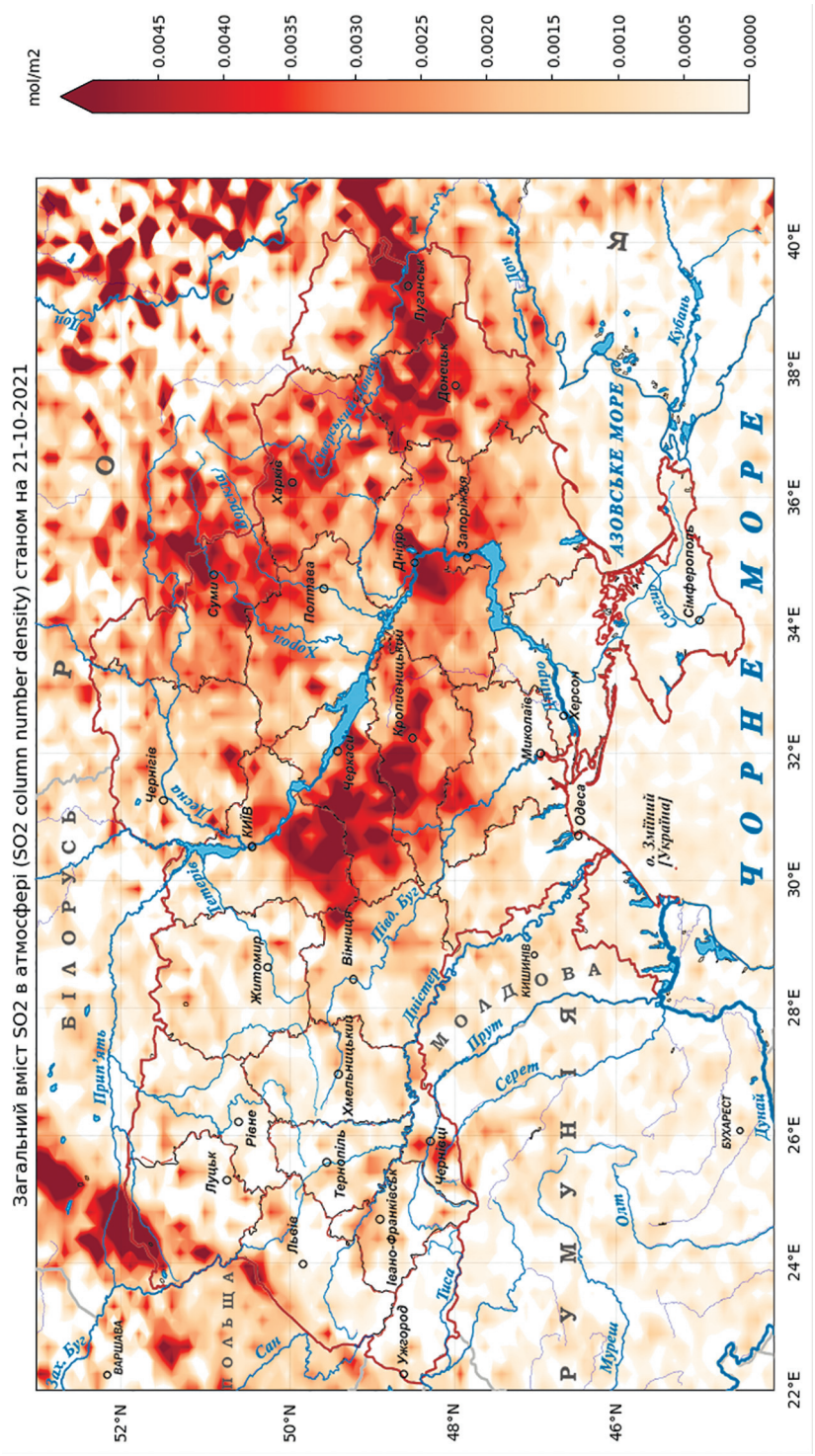


Рис. 3.32. Просторовий розподіл загального вмісту SO_2 в атмосфері від виверження вулкана Кумбре-В'єха на Канарських островах, виявленого автоматизованою системою оцінки якості атмосферного повітря на основі супутникових даних в УкрГМІ 21.10.2021 р. (візуалізація системи)

чний внесок, що їх наслідки простежуються на осереднених за кілька років картах. Наприклад, наслідки пожеж 2020 року можна побачити на просторовому розподілі осередненого вмісту за 2019—2020 роки (рис. 3.18 і 3.19), де в районі інтенсивних пожеж середній вміст перевищує фонові значення. Великі лісові пожежі траплялися в різних частинах території України щороку, а з початком повномасштабного воєнного вторгнення РФ — уздовж лінії фронту (перші оцінки наслідків бойових дій для атмосферного повітря ми обговоримо у підрозділі 4.3).

Під час лісових пожеж, які відбуваються переважно в теплий період року, NO_2 не поширюється далеко від місця горіння, а чіткі осередки підвищеного вмісту не спостерігаються далі, ніж 50—70 км від пожеж. Водночас CO через його тривалість існування в атмосфері може поширюватися добре вираженим шлейфом за напрямком вітру на відстань понад 300 км (напр., рис. 3.29).

Інколи фіксуються досить екзотичні як для території України випадки надходження високих рівнів забруднення атмосферного повітря. Так, у жовтні 2021 року автоматизованою системою оцінки якості атмосферного повітря на основі супутникових даних в УкрГМІ було виявлено аномально високі значення загального вмісту SO_2 в атмосфері (рис. 3.31 і 3.32). Просторовий розподіл забруднення був типовим для транскордонного перенесення, однак настільки високі значення SO_2 на значній за площею території не характерні для антропогенних викидів. Аналіз розподілу SO_2 в масштабах півкулі показав, що надходження SO_2 відбувалося від виверження вулкану Кумбре-В'єха на Канарських островах. Подібне перенесення тривало близько тижня. Зрозуміло, що надходження SO_2 відбувалося на значних висотах і не впливало на якість атмосферного повітря у приземному шарі. По-перше, забруднене повітря не може поширюватися на такі значні відстані в нижніх шарах атмосфери. По-друге, одним із механізмів виведення SO_2 із атмосфери є процеси вологого осадження, що відбувається з опадами або розчиненням SO_2 хмарними елементами. Це опосередковано може свідчити про те, що перенесення відбувалося вище основного шару хмароутворення, тобто на висотах понад 5 км у середній та верхній тропосфері.

3.3. Порівняння супутникових даних Sentinel-5P з наземними даними державної мережі спостережень

Дані Sentinel-5P вже переконливо засвідчили можливість їх використання для досліджень, аналізу та моніторингу забруднення атмосферного повітря від різноманітних джерел викидів: міських автомагістралей та підприємств [39, 57, 58], лісових пожеж [52, 59], кораблів у морях [60], вулканічних вивержень [61—63] тощо. Аргументованість їх використання було підтверджено численними дослідженнями та порівняннями з результата-

ми наземних спостережень [35, 64—69], літакових зондувань [36, 70, 71], інвентаризації викидів [72, 73], моделювання [73—76]. Численні порівняння супутникових даних з вимірюваннями на наземних станціях показали наявність сильних кореляційних зв'язків для NO_2 [65, 68, 76], проте спостерігається певне загальне заниження значень даних, отриманих супутником Sentinel-5P [65, 69], та деяке завищення показників над забрудненими містами [70]. Найбільш проблемним є пряме порівняння точок у місцях з високим забрудненням [69, 77], у яких неузгодженості стрімко зростають, особливо для індивідуальних джерел значних антропогенних викидів NO_2 (наприклад, підприємства або теплоелектростанції) [58, 68]. Порівняння наземних та супутникових даних щодо CO також показало хороше узгодження результатів [35, 67, 72, 75]. Найбільші неузгодженості знайдено для точок у межах великих міст та для даних, отриманих в умовах хмарного неба [64, 78]. Дані щодо CH_2O з TROPOMI зазвичай перевищують наземні значення над чистими районами та недооцінюють високі концентрації [67], але результати порівняння вказують на можливість використання супутникової інформації щодо вмісту CH_2O для осередненої оцінки і узагальнень [71, 79, 80], у тому числі й для аналізу сезонних змін вмісту CH_2O в атмосфері [57, 66]. Найбільші проблеми під час порівняння наземних та супутникових даних виникають для SO_2, який найчастіше використовують для аналізу вулканічних вивержень [61—63, 81] та викидів під час роботи теплоелектростанцій на твердому паливі [38, 61, 82]. Найскладнішим залишається аналіз випадків, пов'язаних з викидами від індивідуальних джерел, коли вже відбулося перенесення забруднення на певну відстань [83].

Більшість наземних даних, використаних для порівняння із супутниковими, було отримано за допомогою сучасних приладів на фонових постах спостережень або на станціях, спеціально створених для валідації супутникових спостережень. Подібні пости організовували, щоб мати інформацію про репрезентативний стан атмосферного повітря для значної території (щонайменше — міський фон). Державна мережа спостережень за забрудненням атмосферного повітря в Україні створювалася свого часу з метою відображення максимального забруднення атмосферного повітря, часто орієнтованого на конкретні джерела викидів. Більше того, методи вимірювання концентрацій забруднюючих речовин, які використовувалися за досліджуваний період, не дозволяють мати хорошу часову дискретність спостережень. Як результат, в Україні для порівняння супутникових спостережень з офіційними даними наземних вимірювань є всього 4 строки на добу, тоді як закордонні дослідження проводяться на основі автоматизованих високоточних приладів з високою деталізацією у часі. З одного боку, деяка обмеженість наземної мережі спостережень, історичний розвиток і орієнтування на максимальне забруднення створює проблеми під час порівняння супутникових та наземних даних. З іншого боку, це дає унікальну

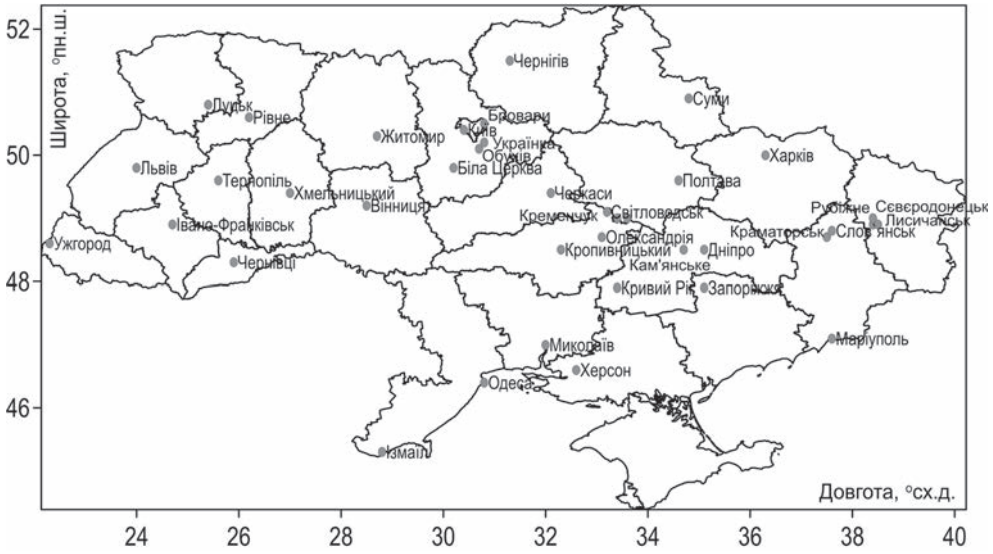


Рис. 3.33. Пункти наземних спостережень за забрудненням атмосферного повітря, дані яких було використано для порівняння з даними Sentinel-5P

можливість експериментального порівняння в таких точках спостережень, у яких за кордоном зазвичай вимірювання не проводяться. Поряд з наявними проблемами моніторингу якості атмосферного повітря зростає роль спільного використання даних наземних і супутникових спостережень. Тоді як дані наземних спостережень є орієнтованими на визначення небезпечних для здоров'я населення перевищень граничних показників, супутникові дані надають додаткову цінну інформацію про причини формування високих рівнів забруднення та фізико-хімічне перетворення забруднюючих речовин в атмосферному повітрі.

Порівняння даних Sentinel-5P із даними наземних спостережень за забрудненням атмосферного повітря на території України, здійсненими Центральною геофізичною обсерваторією імені Бориса Срезневського (ЦГО) на 126 постах моніторингу в 39 містах України, було проведено за період 2019—2020 років [84] (рис. 3.33).

Для правильної інтерпретації результатів порівняння наземних та супутникових спостережень потрібно брати до уваги методи наземних спостережень та точність визначення вмісту забруднюючих речовин. На сьогодні вимірювання вмісту забруднюючих речовин в атмосферному повітрі в державній мережі спостережень продовжують здійснювати згідно з керівним документом РД 52.04.186-89 [85]. Так, вміст NO_2, SO_2 та CH_2O визначають з використанням хемосорбентів або відповідних розчинів для вловлювання забруднюючих речовин із повітря та подальшим визначенням концентрації фотометричними методами. CO визначають з використанням оптоакус-

тичного газоаналізатора на довжині хвилі 4,7 мкм. Використання подібних методів призводить до досить значних похибок вимірювань. Так, сумарна похибка визначення CO не перевищує 10 % для концентрацій, вищих за 0,8 мг/м^3, NO_2 — 18 % для концентрацій понад 0,02 мг/м^3, SO_2 — 25 % для концентрацій, вищих за 0,04 мг/м^3, CH_2O — 25 % для концентрацій більш як 0,01 мг/м^3.

З огляду на час зондування Sentinel-5P та строки наземних спостережень (01:00, 07:00, 13:00, 19:00), порівняння проводили для 13:00 за умови наявності вимірювань. Якщо наземних спостережень о 13:00 не було, порівнювали з даними, наявними у найближчий строк. Крім того, порівняння здійснювали і для осереднених даних за добу на основі наявних строків, хоча зрозуміло, що осереднення за таку малу кількість спостережень за добу не може відобразити характерний усереднений стан забруднення атмосфери.

Для врахування різних умов хмарності та відповідно різної точності супутникових даних, порівняння здійснено окремо для усіх значень, відфільтрованих із часткою хмарності не більш як 0,5, із часткою хмарності не більше 0,1 та для умов ясного неба. Однак є ще одна складність у порівнянні супутникових і наземних вимірювань, яка пов'язана з необхідністю порівняння вмісту у вертикальному стовпі атмосфери з приземною концентрацією. Хоча основна маса наявного забруднення утворюється в приземному шарі, відбувається досить швидке розсіювання забруднюючих речовин в атмосфері та їх підняття на деяку висоту (залежно від метеорологічних умов та фізико-хімічних властивостей забруднюючої речовини). Тому обов'язковою умовою порівняння супутникових та наземних спостережень є врахування висоти граничного шару атмосфери. З огляду на малу кількість станцій та строків температурно-вітрового радіозондування атмосфери в Україні [86, 87], у проведених дослідженнях щогодинні дані ГША взято з реаналізу ERA5 [88]. Похибка визначення висоти ГША в реаналізі ERA5 становить до 130 м [89]. Тому для нівелювання похибок визначення ГША порівняння здійснювали для окремих груп ГША: нижче 500 м; від 500 до 1000 м; від 1000 до 1500 м; вище 1500 м. Такий поділ на групи дозволив отримати понад 100 випадків потрапляння пари (наземні + супутникові) виміряних значень забруднення в кожну з груп для всіх часових рядів спостережень.

Як бачимо з наведених вихідних даних та умов порівняння, для території України на сьогодні це досить складне завдання зі значною кількістю припущень:

1) дані постів наземних спостережень наявні лише для територій поблизу найзабрудненіших ділянок, що не є репрезентативним для більшої території чи при визначенні міського фону. Це приводить до порівняння даних супутникових та наземних спостережень у найгірших з усіх можливих навколишніх умов. Водночас таке порівняння є експериментальним (у

світовій практиці досить мало було проведено порівнянь із наземними даними, зібраними в подібних умовах [84]), що дозволить виявляти причини появи неузгодженостей із супутниковими спостереженнями;

2) наявність щонайбільше чотирьох спостережень на добу значно ускладнює виявлення динаміки концентрацій, у результаті чого зростає «точковість» оцінки, роль часового інтервалу між активністю джерела викидів і даними спостережень та вплив випадкових факторів;

3) значні похибки методів наземних спостережень і недосконаліть методів супутникового зондування хімічних складових атмосфери;

4) вплив хмарності на точність отриманих супутникових даних;

5) вплив висоти ГША та інших метеорологічних умов на розсіювання домішок із приземного шару.

3.3.1. Діоксид азоту (NO_2)

Наявні наземні дані слабо корелюють із тропосферним вмістом NO_2. У більшості точок кореляції незначущі і варіюють від r = –0,20 до r = 0,20 за умов ГША нижче 1000 м та до r = 0,40 за умов ГША вище 1500 м (рис. 3.34). Sentinel-5P погано відображає дані високого рівня забруднення атмосферного повітря в певний час у певній точці за наявності значних антропогенних викидів NO_2 в приземному шарі. Осереднення даних наземних спостережень за добу також не поліпшує ситуацію. Дуже часто максимальні значення загального вмісту NO_2 в тропосфері спостерігаються вже на деякій відстані від джерела викиду. Більше того, за супутниковими знімками іноді спостерігається поширення шлейфів забрудненого повітря. Тому при якісному візуальному порівнянні наземних та супутникових даних над значною територією, вони добре узгоджуються. Проте пряме порівняння та кількісний аналіз у конкретних точках (порівняння даних поста спостережень з пікселем, що покриває відповідну територію) не дає хорошого узгодження, особливо над точками зі значними антропогенними викидами NO_2 у приземному шарі. Неузгодженість виникає через процеси перенесення забруднення від джерела викидів, тому одиничне зондування на добу та значна часова дискретність наземних вимірювань часто не відповідає активності джерела викиду. Тому при якісному візуальному аналізі ми бачимо поширення забруднення за переважаючим напрямком вітру, але в конкретній точці приземна концентрація вже не збігається з вмістом забруднюючої речовини у вертикальному стовпі тропосфери. Спроба осереднити всі наявні наземні дані та всі пікселі над територією міста не поліпшує результат (рис. 3.35), що пов'язано з особливостями розміщення постів спостережень, орієнтованих не на репрезентативні точки для районів міста, а на місця формування високого рівня забруднення.

В окремі місяці року залежно від поста моніторингу можуть з'являтися значущі кореляції. Середні кореляційні залежності між супутниковими та

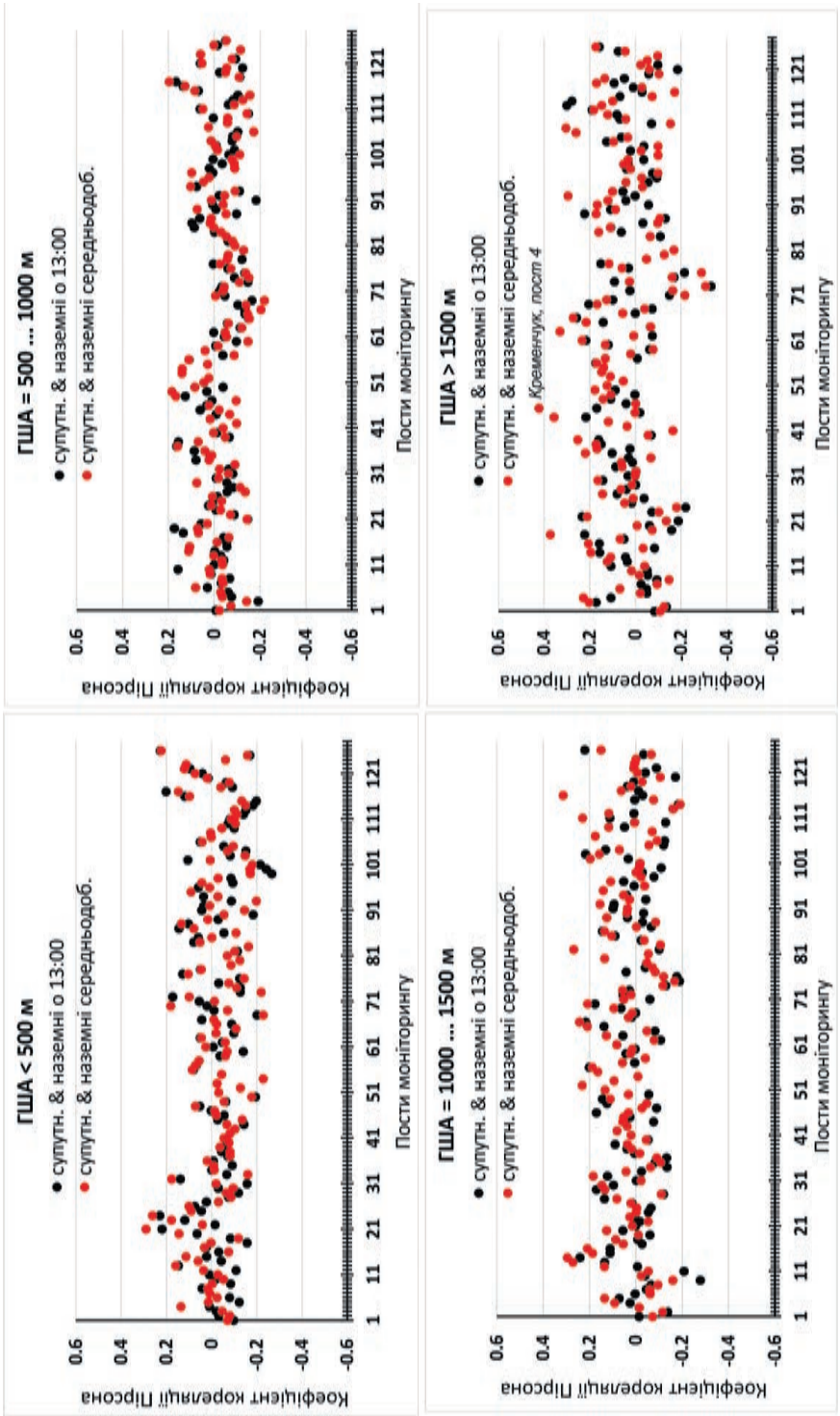


Рис. 3.34. Кореляції між супутниковими даними загального вмісту NO_2 в тропосфері та наземними даними NO_2, вимірюваними на постах моніторингу о 13:00 (чорні позначки), а також осередненими за добу (червоні позначки) для різних висот ГША

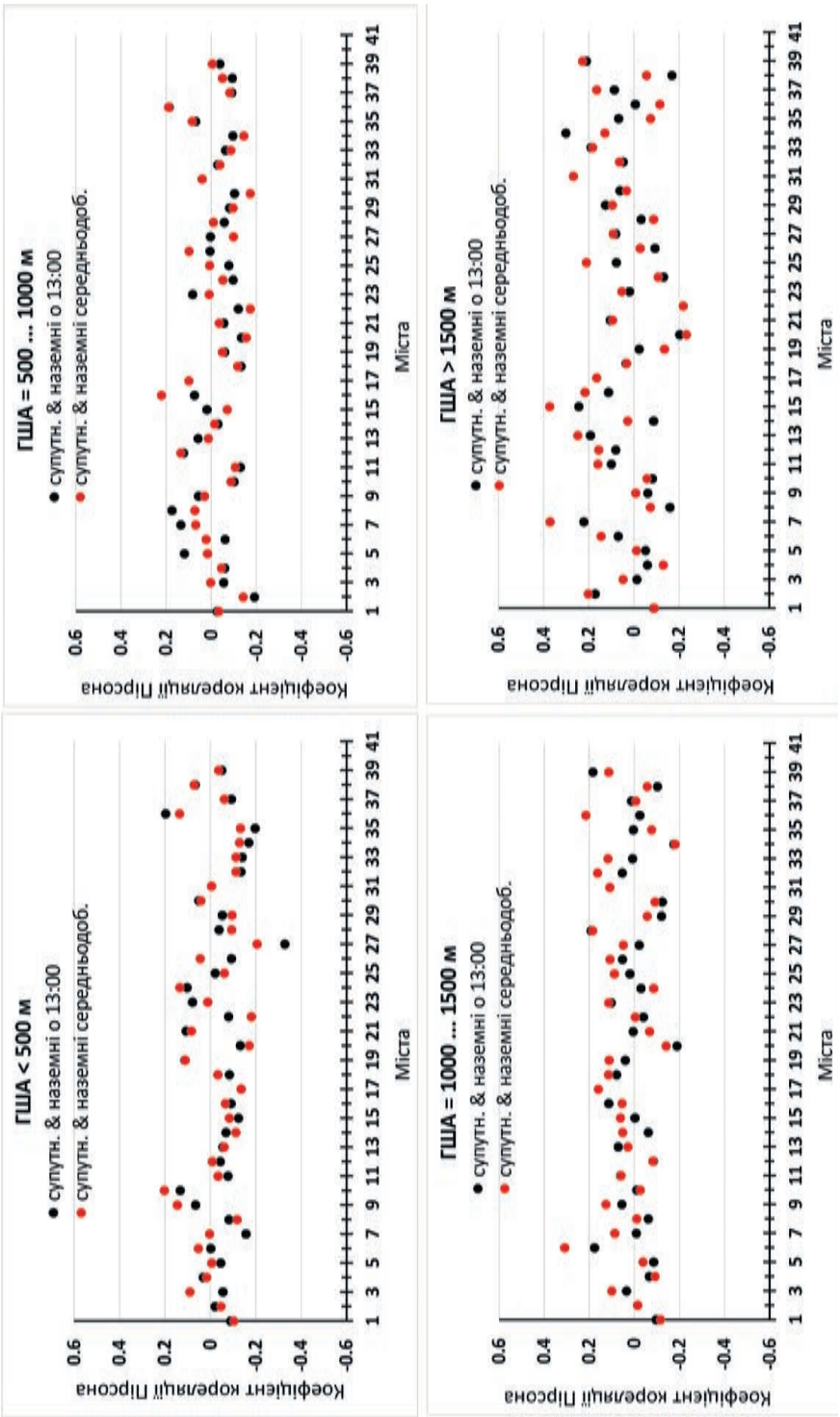


Рис. 3.35. Кореляції між супутниковими даними загального вмісту NO_2 в тропосфері та наземними даними NO_2, осередненими над територією міст о 13:00 (чорні позначки), а також осередненими за добу (червоні позначки) для різних висот ГША

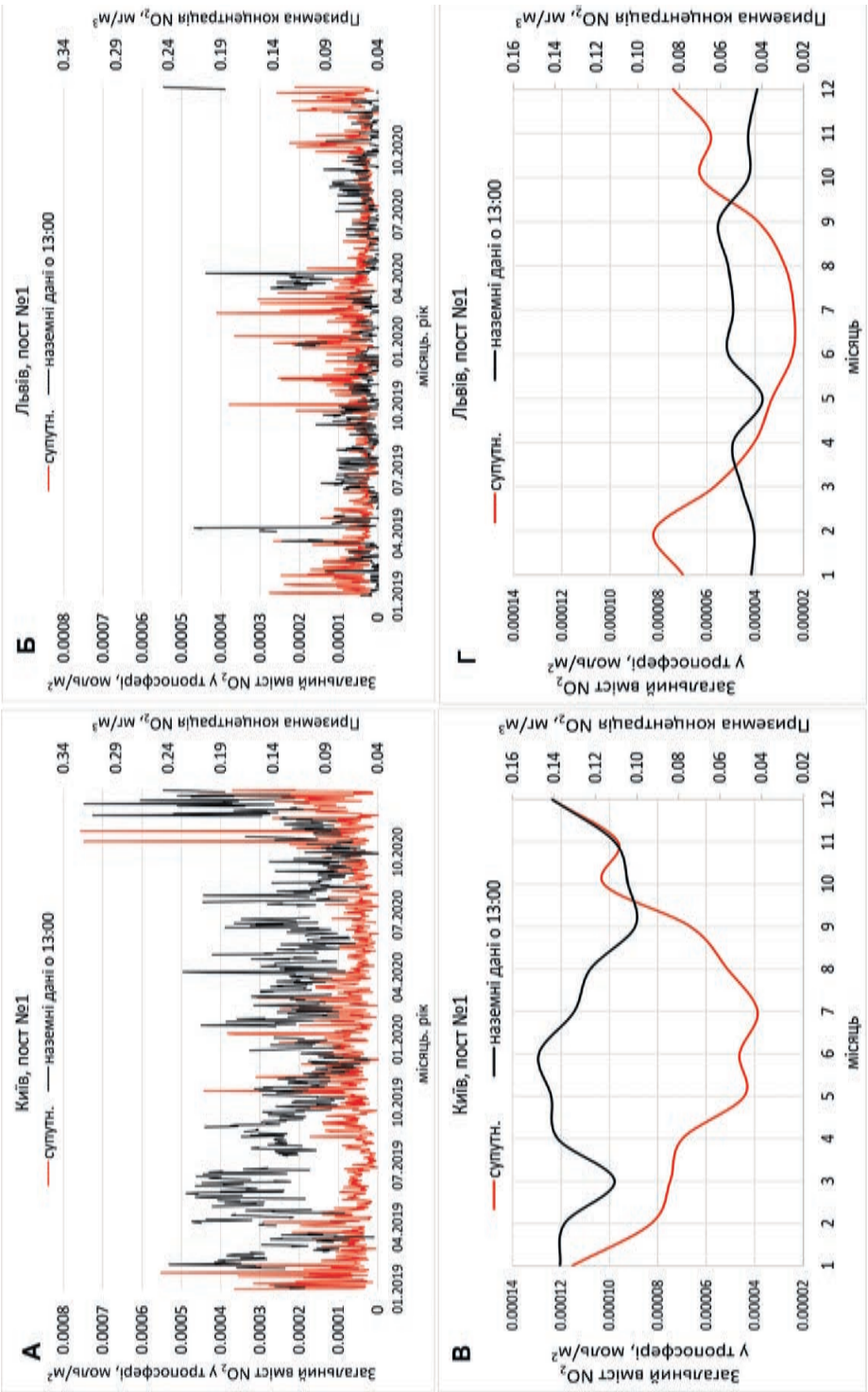


Рис. 3.36. Часовий хід (*а, б*) та середньомісячні значення (*в, г*) супутникових даних загального вмісту NO_2 у тропосфері та наземних спостережень о 13:00 на прикладі поста № 1 у м. Київ та поста № 1 у м. Львів

наземними даними щодо NO_2 спостерігаються в містах Кременчук, Ізмаїл і Тернопіль у липні–серпні, де коефіцієнти кореляції досягають r = 0,60, Поява залежності в літні місяці в цих містах є виключно локальним явищем, пов'язаним із розташуванням постів спостережень.

Фільтрування за різних умов хмарності дещо посилює кореляційні зв'язки. За умов безхмарного неба у травні, липні та серпні на окремих постах спостерігаються кореляції до r = 0,63 для 13:00 та до r = 0,71 для осереднених за добу наземних значень вмісту NO_2.

Поява негативних кореляцій між супутниковими та наземними даними щодо NO_2 може видаватися дивною (рис. 3.34 і 3.35), але це пов'язано з особливостями розташування наземних постів моніторингу. Негативний зв'язок з'являється через протилежні сезонні зміни між приземними концентраціями та вмістом у вертикальному стовпі атмосфери (рис. 3.36).

На рис. 3.36 наведено часові ряди та річний хід NO_2 у 2019—2020 роках на прикладі поста № 1 у м. Київ з одним із найвищих коефіцієнтів кореляції та поста № 1 у м. Львів з одним із найнижчих коефіцієнтів кореляції. Дослідження в різних країнах свідчать, що літні максимуми NO_2 не є типовими для міст та забруднених районів [90—92]. Проте літні максимуми часто простежуються за даними українських постів спостережень. Аналіз даних з постів в українських містах [84] показали, що формування літніх максимумів відбувається за рахунок даних, отриманих для строків 13:00 і 19:00, На жаль, часова дискретність рядів наземних спостережень в Україні не дозволяє дослідити причини зміни сезонності NO_2 порівняно з типовою сезонністю інших європейських міст. Цілком можливо, що відповідь на це питання криється у розташуванні постів моніторингу з орієнтацією на високі рівні забруднення, а не на фоновий вміст. Проте саме формування сезонних літніх максимумів відповідальне за появу негативних кореляційних зв'язків між наземними та супутниковими спостереженнями. Звичайно, наведена вище точність вимірювань може мати частковий вплив на отримані значення, але сезонна відмінність концентрацій набагато перевищує можливі похибки.

Приземний вміст NO_2, за даними постів моніторингу в Україні, влітку зазвичай вищий на 0,02—0,04 мг/м^3 порівняно із сезонним мінімумом (рис. 3.36), який може спостерігатися восени / взимку / навесні, залежно від міста. На противагу даним наземних спостережень в Україні, загальний вміст NO_2 у тропосфері характеризується чітким зимовим максимумом, досягаючи 8—12·10^{-5} моль/м^2, та чітким сезонним мінімумом у травні–серпні зі значеннями нижче 4·10^{-5} моль/м^2. Вміст NO_2 взимку вищий через значно довший час існування NO_2 в атмосфері [91]. Це приводить до поступового накопичення NO_2, що й простежується у вертикальному стовпі в тропосфері. Водночас, незалежно від сезону року, NO_2 розсіюється з приземного шару, де розташовані основні джерела викидів. Цей процес також суттєво

впливає на відмінність між приземним рівнем концентрації та загальним вмістом. Чим більша різниця в часі між моментом викиду та моментом зондування / спостереження, тим більшою буде відмінність між приземними та висотними концентраціями.

Отже, умови та методи наземних спостережень, які використовує державна мережа спостережень за забрудненням атмосферного повітря в Україні, призводять до формування відмінностей між супутниковими та наземними даними. Цьому є дві основні причини на різних часових масштабах:

1) на часовому масштабі від годин до одного дня різниці між наземними та супутниковими даними формуються через різницю в часі викиду і часі зондування або наземного спостереження, в результаті чого NO_2, який надійшов в атмосферу, встигає розсіятися або переноситься за переважаючим напрямком вітру;

2) на часовому масштабі від місяців до сезонів різниці формуються за рахунок протилежної сезонної мінливості NO_2 між приземним шаром та у вільній тропосфері.

3.3.2. Монооксид вуглецю (CO)

О 13:00 CO вимірюють на дуже малій кількості постів, що унеможливлює порівняння з супутниковими даними Sentinel-5P для найближчого строку спостережень. Тому аналіз здійснено лише на середньодобових даних. Кореляційні зв'язки між наземними та супутниковими даними щодо CO сильніші порівняно з NO_2, проте для більшості постів спостережень вони є незначущими (рис. 3.37). Кореляції варіюють від r = –0,40 до r = 0,60 для загального досліджуваного періоду. Причини неузгодженості залишаються ті ж самі: приземний CO вимірюють поблизу джерел антропогенної емісії, тоді як супутникові дані охоплюють загальний стовп атмосфери. Досить тривалий час існування CO в атмосферному повітрі, що досягає кількох місяців [93], посилює відмінність між вмістом у вертикальному стовпі та наземними концентраціями. Поблизу землі CO швидко розсіюється і піднімається вгору, тоді як в атмосфері він накопичується та поступово рівномірно розподіляється у просторі. Залежно від висоти ГША значущі кореляції спостерігаються на постах у Харкові, Горішніх Плавнях та Вінниці (рис. 3.37).

Ці міста мають різну кількість постів, різні положення відносно джерел викидів, відмінні й самі джерела викидів та вміст CO, що зайвий раз підтверджує локальні особливості формування концентрацій поблизу постів спостережень. І лише частина з них характеризуються сприятливими зовнішніми умовами для можливості узгодження даних наземних спостережень із даними Sentinel-5P. Осереднення над всією територією міст навіть погіршує кореляційні залежності (рис. 3.38), що також свідчить про «локальність» виміряних наземних даних, а не про репрезентативність для міського фону.

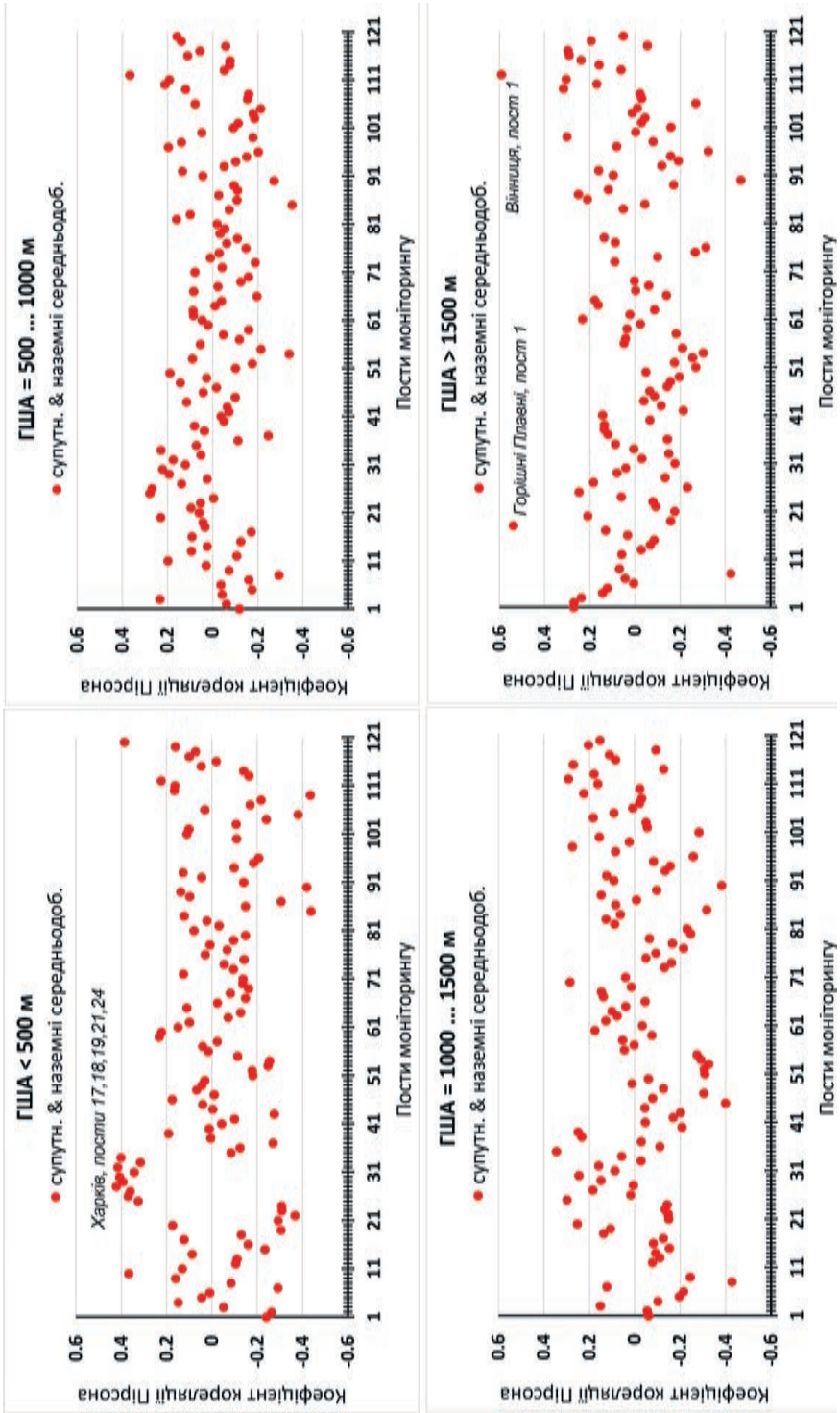


Рис. 3.37. Кореляції між супутниковими даними загального вмісту CO в атмосфері та наземними даними щодо CO, осередненими за добу для різних висот ГША

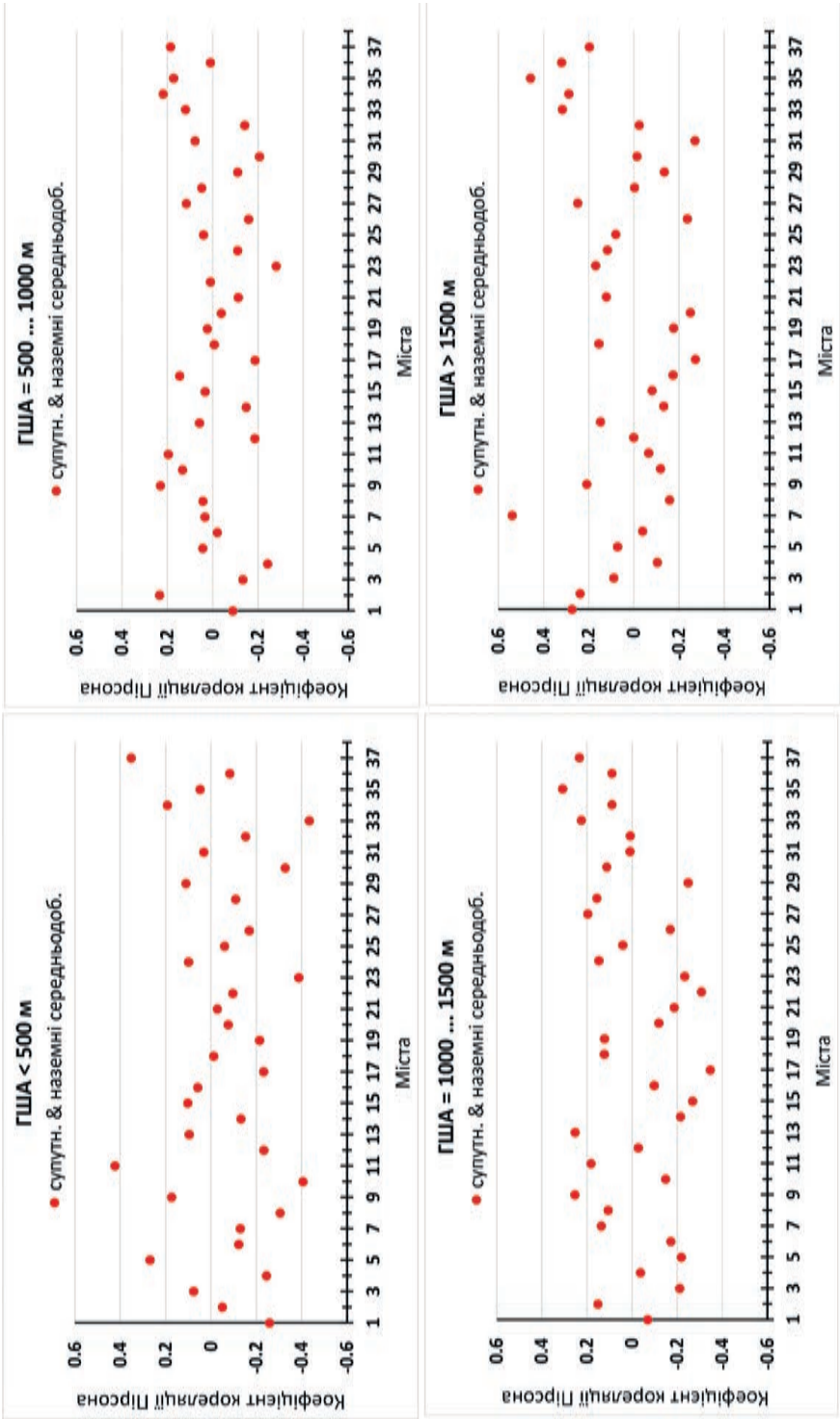


Рис. 3.38. Кореляції між супутниковими даними загального вмісту CO в атмосфері та наземними даними щодо CO, осередненими за добу над територією міст для різних висот ГША

Негативні кореляції з'являються тоді, коли вміст CO над конкретною територією формується більшою мірою завдяки надходженню забрудненого повітря, а не від локальних джерел викидів. Ще одною причиною формування подібних неузгодженостей є, навпаки, розташування поста спостережень дуже близько до джерела промислових викидів. У цьому разі локальні максимуми CO завжди формуються у приземному шарі (або нижче висоти ГША) і часто не фіксуються під час супутникового зондування у вертикальному стовпі атмосфери або через низькі концентрації на інших висотах, що нівелюють високий приземний вміст у загальному стовпі, або через несприятливі умови для зондування, зокрема хмарність, низьку видимість тощо (при цьому показник у вертикальному стовпі формується на основі переважно тих концентрацій, що розташовані вище в атмосфері).

Фільтрування хмарності приводить до зростання варіативності кореляцій: від r = –0,45 до r = 0,65 для частки хмарності нижче 0,5 та від r = –0,53 до r = 0,70 за умов ясного неба. Зв'язок між наземними та супутниковими даними щодо CO значно зростає в дні з низькими антропогенними викидами (по суті, це відсутність високих концентрацій у приземному шарі).

На рис. 3.39 наведено часовий хід та сезонну мінливість CO для міст з найкращим та найгіршим кореляційним зв'язком між наземними та супутниковими даними щодо CO. Найгірший зв'язок характерний для міст, для яких немає чіткого зимового максимуму викидів CO, тобто для міст з постійними промисловими викидами протягом року. За відсутності чіткого максимуму викидів і вмісту CO взимку зростає роль похибок визначення CO.

Для більшості міст сезонні зміни CO у стовпі атмосфери та поблизу земної поверхні часто є подібними (напр. рис. 3.39*в*). Однак на денному часовому масштабі це не так, і збіг сильно залежить від циркуляційних умов (рис. 3.39*а* і 3.39*б*). Найбільша різниця спостерігається в період максимального вмісту CO. В Україні [38], як і у багатьох інших країнах світу [94, 95], вміст CO зростає переважно в холодний період року, досягаючи найвищих значень ранньою весною. В Україні значну роль відіграють теплоелектростанції, які працюють на твердому паливі. Вміст CO дуже стрімко зменшується зі зростанням температури атмосферного повітря та збільшенням активності радикалів OH, що сприяє інтенсивному хімічному виведенню CO з атмосфери [94, 95]. Однак в Україні в березні починається період весіннього спалювання рослинних решток на полях, в результаті чого в атмосферу надходять значні додаткові викиди CO [38, 53]. Тому у загальному стовпі атмосфери вміст CO починає зменшуватися лише у квітні, із завершенням сезону активного спалювання сухостою. Поряд з описаними сезонними особливостями на більшості наземних постах спостережень фіксується абсолютно протилежний часовий хід (рис. 3.39*г*). Сезонна мінливість CO на таких постах залежить тільки від активності конкретних джерел антропо-

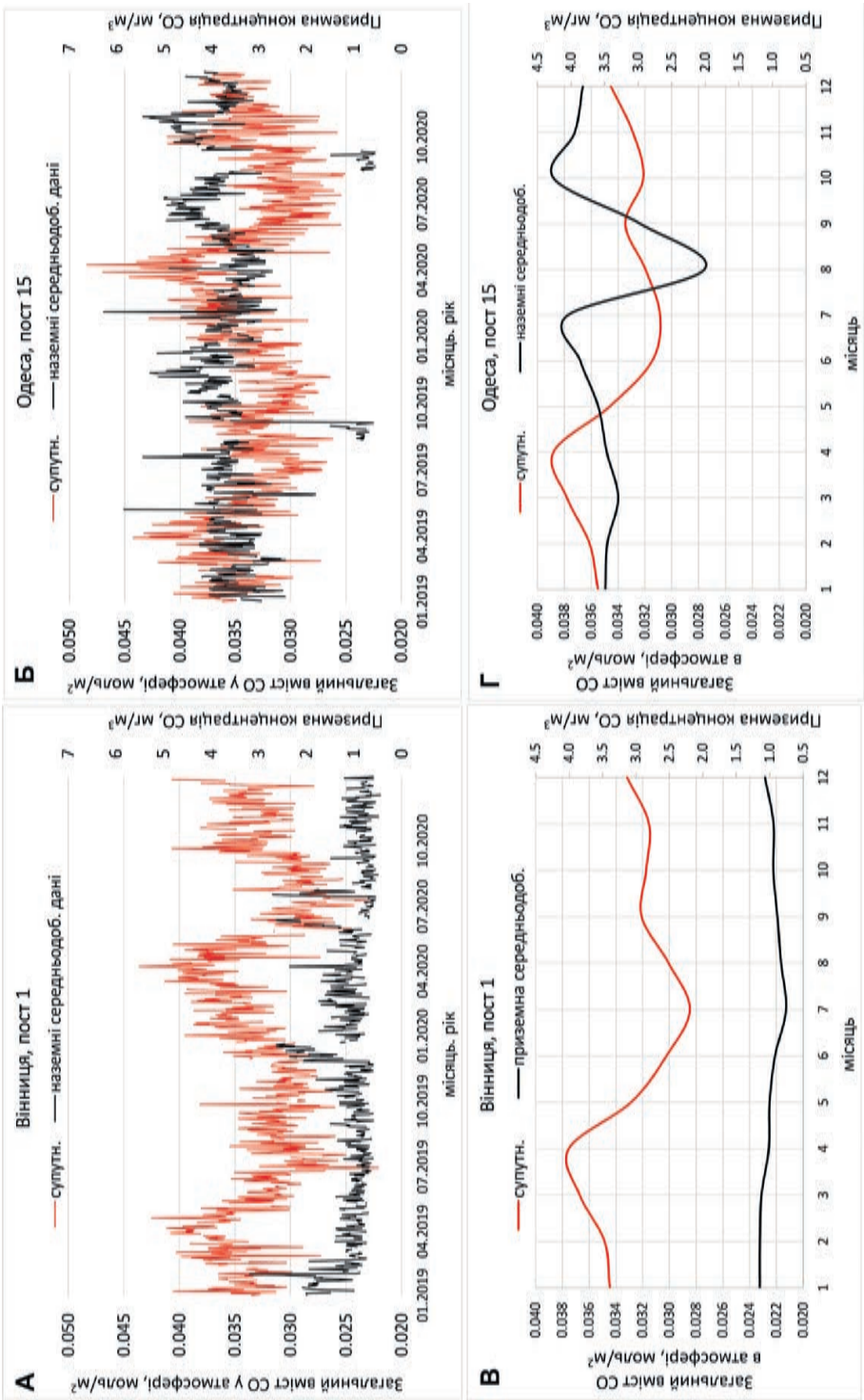


Рис. 3.39. Часовий хід (*а, б*) та середньомісячні значення (*в, г*) супутникових даних загального вмісту CO в атмосфері та наземних середньодобових значень на прикладі поста № 1 у м. Вінниця та поста № 15 у м. Одеса

генних викидів, без будь-якого зв'язку з типовою сезонністю CO. Більше того, часова мінливість на постах формує менші різниці у значеннях, ніж похибки, що можуть виникати через недосконаліть методів вимірювання, які застосовуються в державній мережі спостережень.

3.3.3. Формальдегід (CH_2O) і діоксид сірки (SO_2)

Кореляційні зв'язки між загальним вмістом CH_2O у тропосфері за даними Sentinel-5P та наземними спостереженнями варіюють в межах від r = –0,20 до r = 0,56. Вплив хмарності незначний — відмінність у зв'язках за умови хмарного та ясного неба не перевищує r = ±0,1. Найкращі залежності знайдено для окремих постів спостережень як у Кривому Розі, Дніпрі, Києві та Ужгороді (рис. 3.40) так і загалом по місту (рис. 3.41) залежно від висоти ГША. Простежується залежність від обсягів викидів CH_2O: чим вищі рівні викидів у містах, тим краще узгоджуються наземні та супутникові дані [84]. Кореляції послаблюються на відстані від антропогенних джерел емісії CH_2O. Супутникові дані Sentinel-5P добре фіксують літні максимуми CH_2O та за якісним аналізом характеризуються хорошим збігом з наземними спостереженнями. Проте зворотна картина спостерігається у містах з малими викидами та низькими концентраціями CH_2O, оскільки там зростає роль точності наземних спостережень (як зазначалося вище, похибки вимірювання CH_2O становлять 25 %).

Зазвичай вміст CH_2O над містами України вищий протягом літніх місяців (рис. 3.42). Значущість сезонної мінливості, а отже, і кращі можливості співставлення наземних та супутникових даних залежать від обсягів антропогенних викидів. Сезонні зміни як приземних концентрацій, так і вмісту CH_2O у стовпі тропосфери добре виражено там, де приземні концентрації перевищують 0,01 мг/м^3 і можуть бути проаналізовані на фоні великих похибок наземних вимірювань. За приземних концентрацій CH_2O, нижчих за 0,005 мг/м^3, точний аналіз і отримання значущих результатів внутрішньорічних змін практично неможливі. Тоді як вміст CH_2O у стовпі тропосфери вказує на наявність зимових максимумів, за наземним даними спостережень сезонних змін практично не спостерігається (рис. 3.42*г*).

Узгодженість наземних і супутникових даних CH_2O сильно залежить від рівня забруднення та сезонних особливостей надходження викидів. З одного боку, дані CH_2O є менш точними через вплив аерозолів в атмосферному повітрі [66], що може бути перешкодою до їх узгодження над забрудненими ділянками. З іншого боку, чисті райони, в яких немає сезонних коливань вмісту CH_2O, також впливають на можливість узгодження супутникової та наземної інформації. Тому для території України найкращі кореляції спостерігаються саме над забрудненими ділянками, де викиди CH_2O характеризуються періодичними змінами в надходженні протягом року. Загалом з урахуванням результатів досліджень в Україні та світі, су-

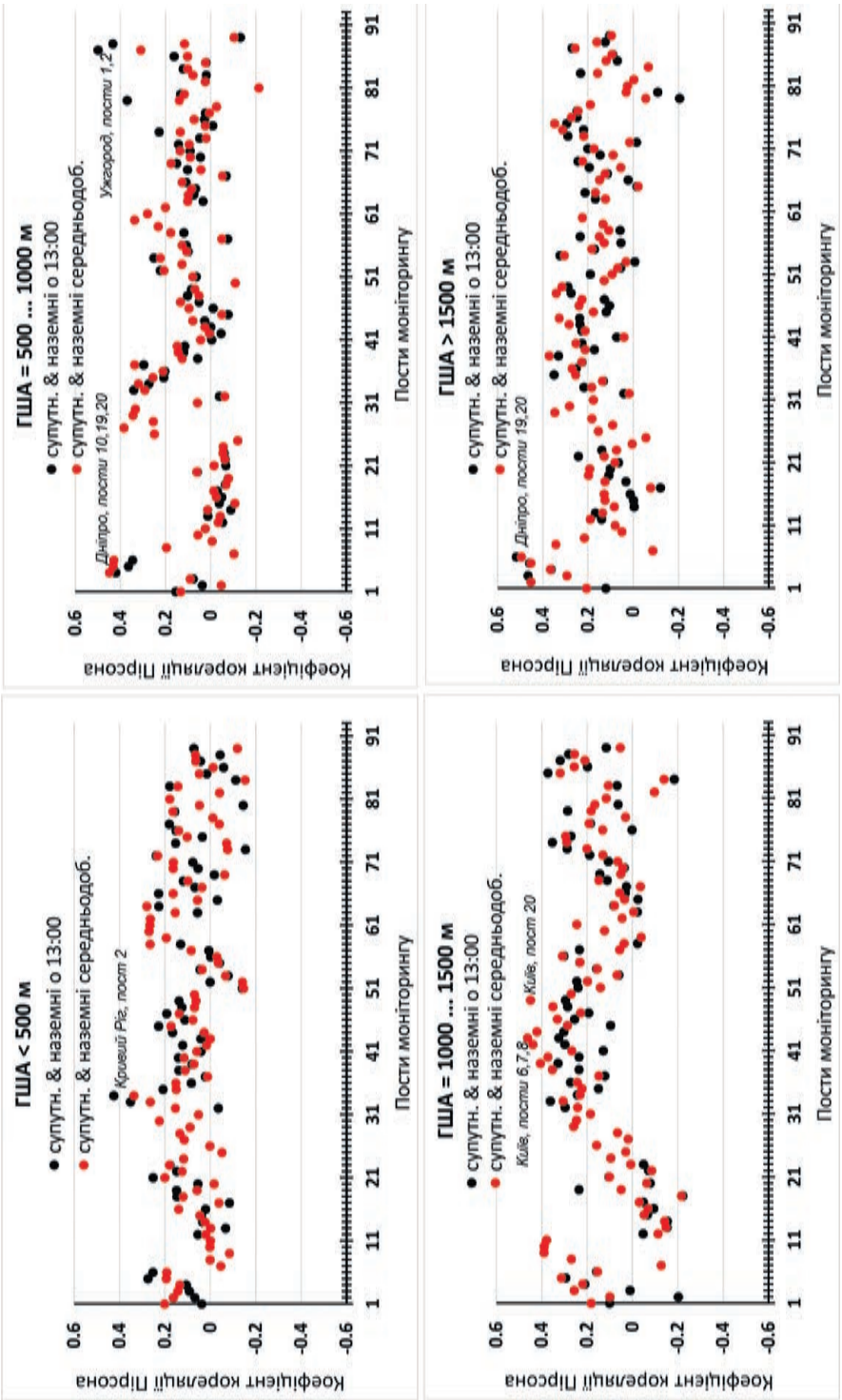


Рис. 3.40. Кореляції між супутниковими даними щодо загального вмісту CH_2O у тропосфері та наземними даними, виміряними на постах моніторингу о 13:00 (чорні позначки), а також осередненими за добу (червоні позначки) для різних висот ГША

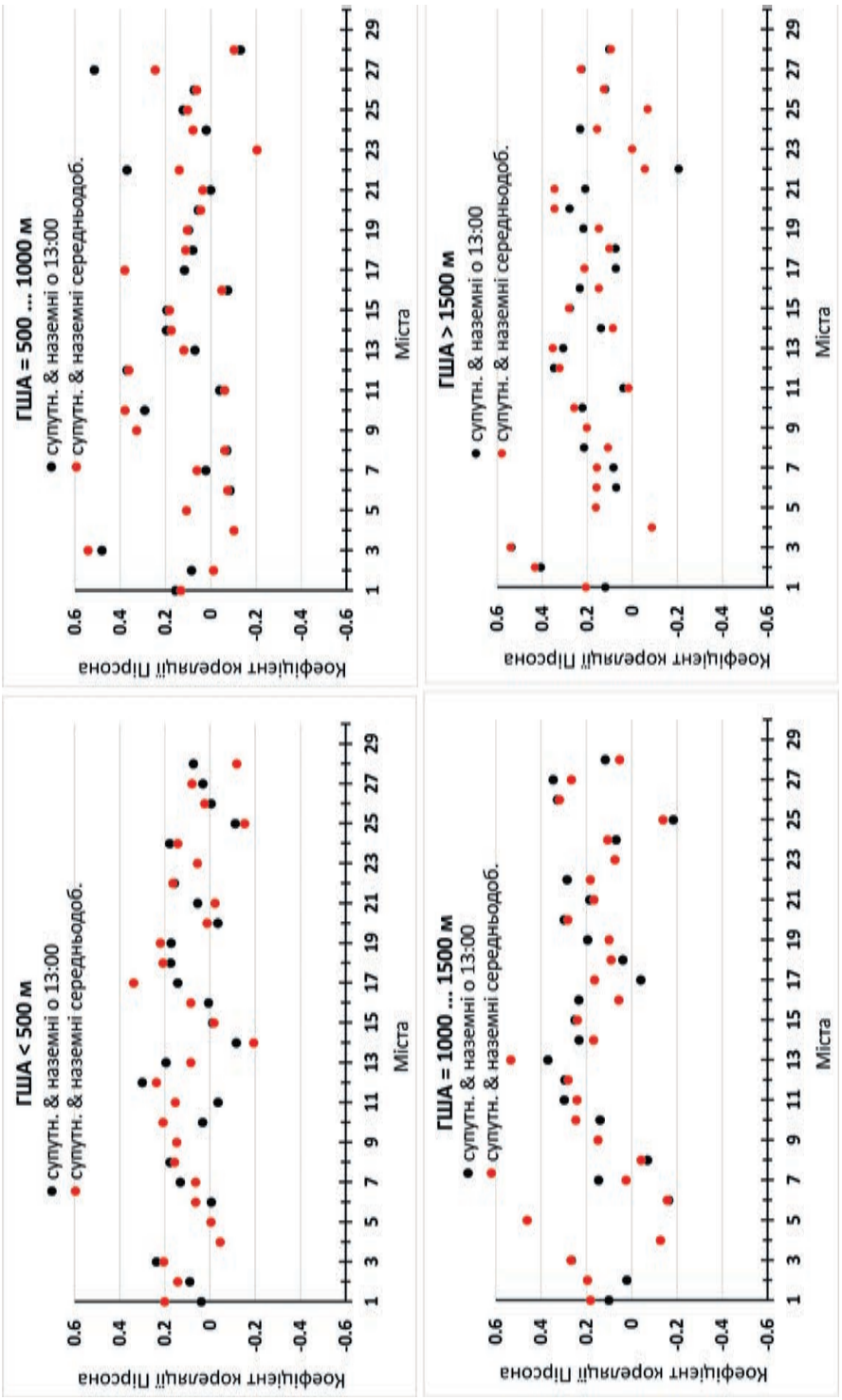


Рис. 3.41. Кореляції між супутниковими даними щодо загального вмісту CH_2O у тропосфері та наземними даними, осередненими над територією міст о 13:00 (чорні позначки), а також осередненими за добу (червоні позначки) для різних висот ГША

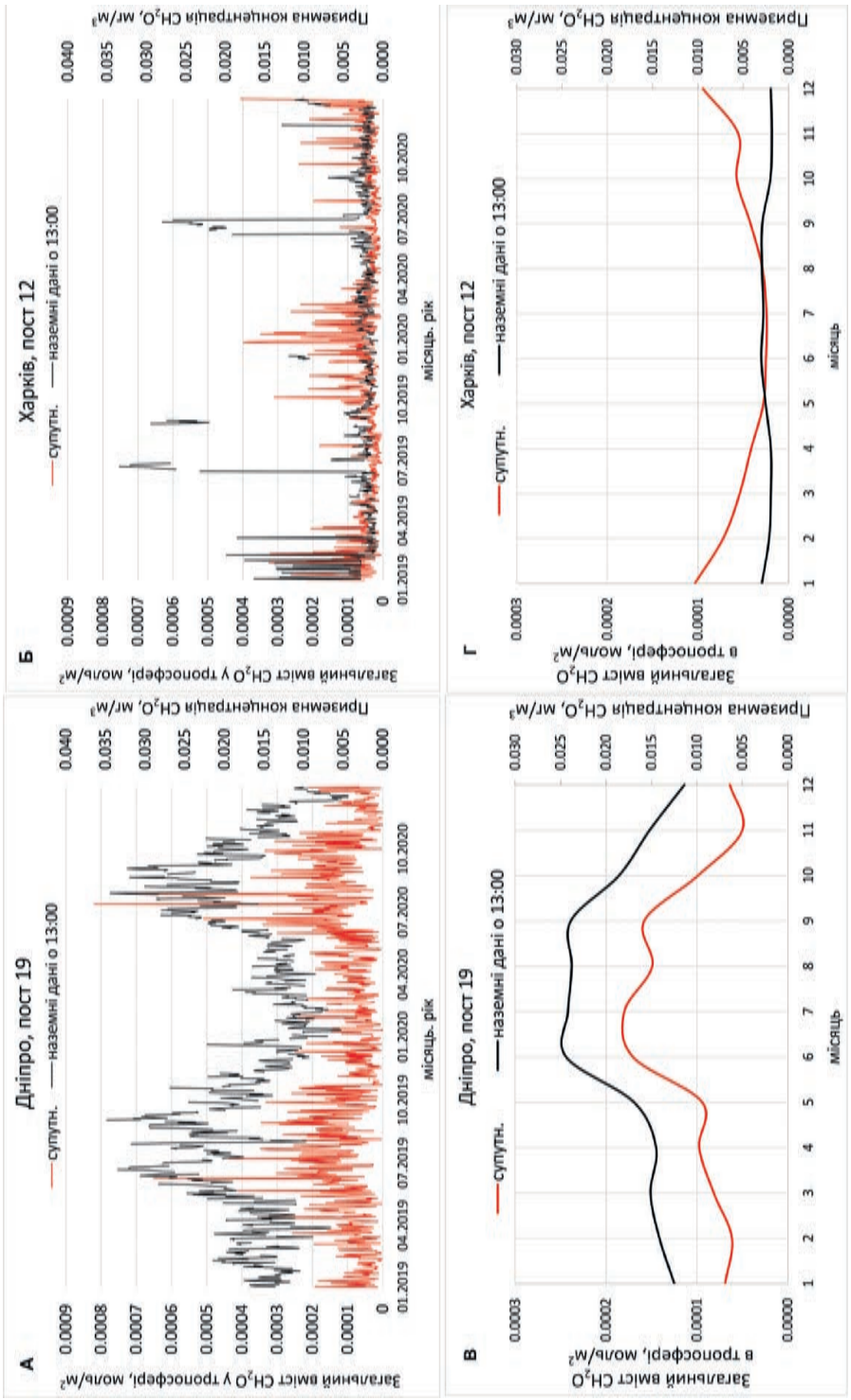


Рис. 3.42. Часовий хід (*а, б*) та середньомісячні значення (*в, г*) супутникових даних загального вмісту CH_2O у тропосфері та наземних спостережень о 13:00 на прикладі поста № 19 у м. Дніпро та поста № 12 у м. Харків

путникові дані щодо CH_2O більш придатні для моніторингу екстремально високого вмісту поза антропогенними джерелами викидів, наприклад, від лісових пожеж.

Кореляції між супутниковими та наземними даними SO_2 варіюють від r = –0,37 до r = 0,59 (рис. 3.43). Найкраще узгодження даних спостерігається в містах з низькими концентраціями протягом теплого періоду року (з квітня до жовтня) та з вираженим сезонним максимумом під час опалювального сезону (з листопада до березня). У випадку постійних викидів SO_2 протягом року від промислових підприємств або ТЕС на твердому паливі за даними Sentinel-5P можна проводити якісний аналіз високого вмісту. Проте циркуляційний вплив та наявність лише одного зондування на добу часто унеможливлює кількісний аналіз у точці над промисловим об'єктом, адже хмара забрудненого повітря може зміщатися за переважаючим напрямком вітру. Найкраще супутникові та наземні дані щодо SO_2 узгоджуються для постів № 4 і № 5 у м. Кременчук за висоти ГША нижче 500 м, та для поста № 3 у м. Чернівці за висоти ГША вище 1500 м (рис. 3.43). Фільтрування за різної частки хмарності може як поліпшити, так і погіршити зв'язок між показниками. Часто це залежить від висоти труб на промислових об'єктах. Наприклад, для м. Кременчук за умов ясного неба кореляція між загальним вмістом SO_2 в атмосфері та наземними концентраціями досягає r = 0,80. Як і для інших забруднюючих речовин, осереднення над територією міст не покращує результати порівняння (рис. 3.44), насамперед через нерепрезентативність наземних постів спостережень для відображення міського фонового вмісту SO_2.

У міжнародній практиці супутникові спостереження вмісту SO_2 використовують передусім для виявлення й дослідження високих концентрацій, тобто таких, які утворюються, наприклад, під час вулканічних вивержень [61]. Подібні закономірності спостерігаються і в Україні, коли загальний вміст SO_2 якнайкраще виявляється під час опалювального сезону над територіями з переважаючим використанням твердого палива [38].

Порівняння наземних спостережень в Україні з даними супутника Sentinel-5P показало в цілому погану узгодженість. Однак основний висновок, який варто зробити з цього порівняння — це важливість використання обох джерел даних щодо вмісту забруднюючих речовин для отримання якомога більш повної картини процесів, що призводять до забруднення атмосферного повітря. Як свідчать результати проведеного аналізу, наявні на сьогодні наземні пости моніторингу та супутникова інформація не можуть замінити в Україні одне одного, і навряд чи така взаємозамінність стане можливою у найближчі десятиліття (враховуючи необхідність переобладнання наземної мережі та недосконаліть супутникового зондування). Натомість спільне використання всіх джерел даних про вміст забруднюючих речовин в атмосферному повітрі є єдиним правильним і оптимальним шля-

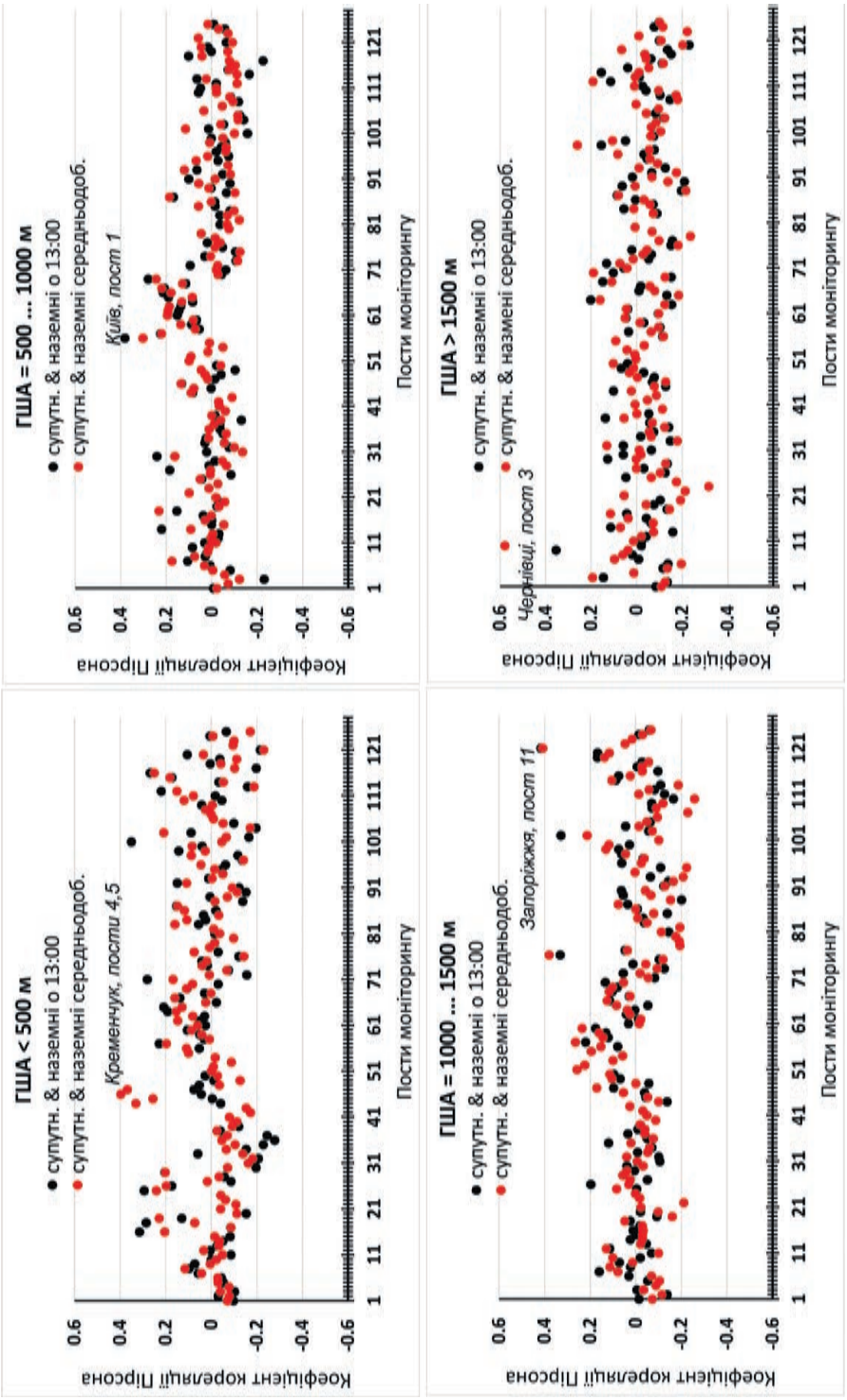


Рис. 3.43. Кореляції між супутниковими даними загального вмісту SO_2 в атмосфері та наземними даними, вимірюваними на постах моніторингу о 13:00 (чорні позначки) та осередненими за добу (червоні позначки) для різних висот ГША

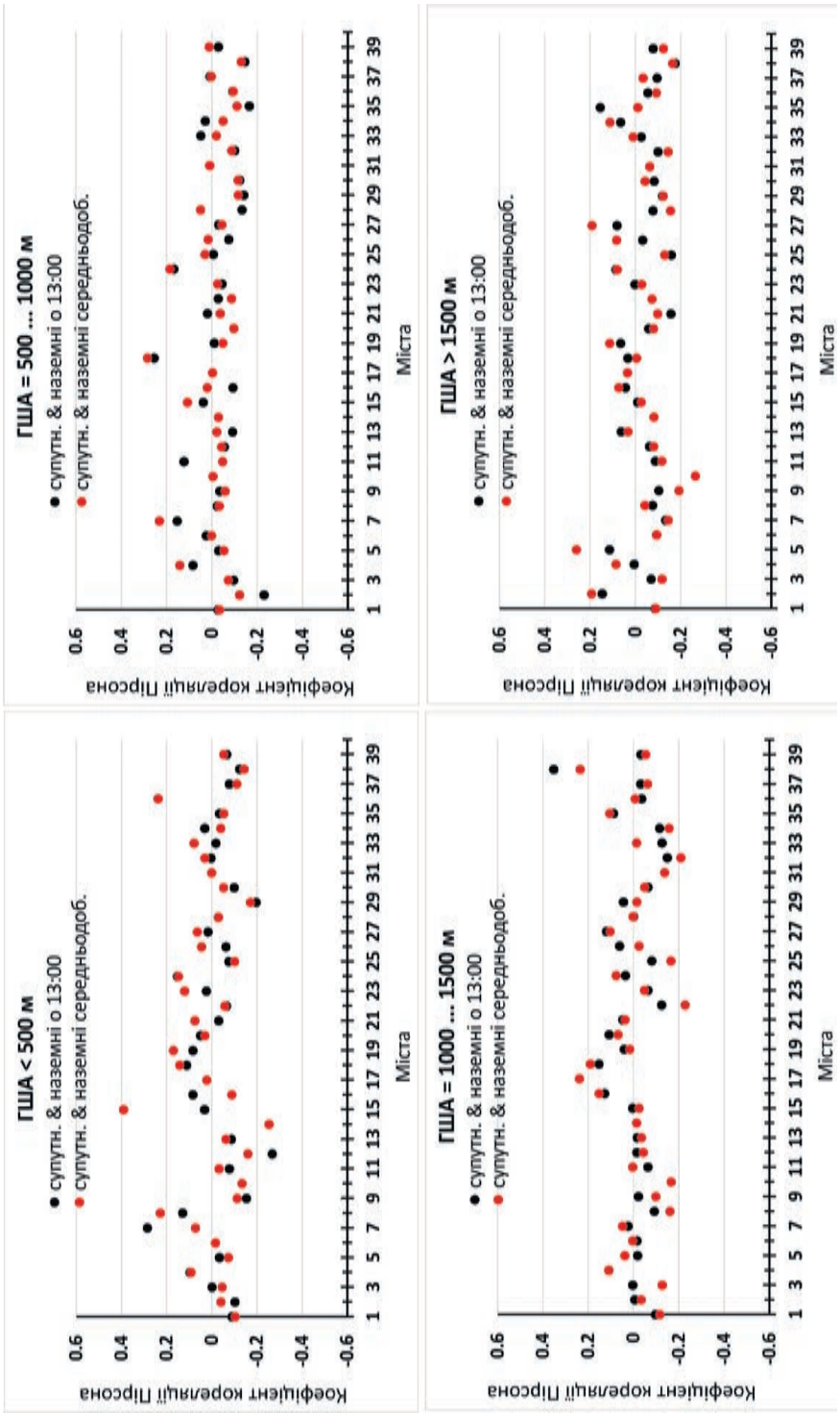


Рис. 3.44. Кореляції між супутниковими даними загального вмісту SO_2 у тропосфері та наземними даними SO_2, осередненими над територією міст о 13:00 (чорні позначки) та осередненими за добу (червоні позначки) для різних висот ГША

хом розвитку як моніторингу якості атмосферного повітря, так і наукових досліджень забруднення атмосфери. Більш того, різна висота джерел викидів та залежність вмісту забруднюючих речовин від метеорологічних умов актуалізують необхідність створення якомога більшої кількості наземних метеорологічних станцій, станцій радіозондування атмосфери, сучасних автоматизованих метеорологічних постів для оперативного моніторингу та прогнозування забруднення атмосферного повітря.

3.4. Забруднення атмосферного повітря в Україні порівняно з іншими країнами Європи

У цій книзі багато уваги приділялося формуванню тих чи інших рівнів забруднення атмосферного повітря залежно від джерел викидів. Вище було показано, що максимуми забруднюючих речовин формуються переважно від антропогенних джерел викидів, тоді як природні джерела зрідка можуть досягати таких потужностей та мало впливають на формування поля забруднення. Згадано було і про роль метеорологічних та кліматичних умов, які визначають подальшу поведінку забруднюючих речовин в атмосфері після їх емісії. Проте, якщо поглянути на всі ці процеси глобальніше, стає очевидним, що джерела антропогенної емісії, що фактично визначають якість повітря, яким дихає людина, також сформувалися не випадково. Стан атмосферного повітря зараз багато в чому визначається історією розвитку країн, технологічними процесами та політичними рішеннями. Цей підрозділ покликаний пояснити, що формування джерел викидів не відбувається випадково, а залежить від геополітичних аспектів. І супутникові дані дозволяють поглянути «згори» на наслідки геополітичних процесів. Ми акцентуємо увагу на позитивних і негативних аспектах забруднення атмосферного повітря в Україні порівняно з іншими державами. Крім того, у підрозділі 4.3 розглянемо наслідки бойових дій для забруднення атмосферного повітря після повномасштабного воєнного вторгнення РФ на територію України у 2022 році.

Дуже часто у засобах масової інформації та соціальних мережах ширить-ся інформація на зразок: «*Київ став найзабрудненішим містом світу*» або «*Київ увійшов до трійки назабрудненіших міст*». «Гучні» заголовки підхоплює широкий загал, більша частина якого навряд чи перевіряє інформацію, не кажучи вже про її критичне осмислення, яке потребує зусиль для пошуку додаткової інформації про забруднення атмосферного повітря загалом. Що ж помилкового у подібних «новинах»? Почитавши до кінця їх текст, зазвичай можна знайти в ньому такі фрази, як «*станом на певну годину… місто увійшло у список назабрудненіших у світі… за даними сайту, що має власну мережу спостережень…*». І помилкове тут практично все. По-перше, «*станом на певну годину*» на одному кінці світу великий мегаполіс спить, а на іншому — як раз година «пік» і люди прямують на роботу. Очевидно, що коли

«прокинеться» перше місто, там також настане година «пік», а друге місто в цей час почне «засинати». Отже, в жодному разі не можна складати рейтинги найбільш забруднених міст станом на якусь годину, бо концентрації забруднюючих речовин взагалі не характеризують ступінь забруднення в містах, інтенсивність викидів та небезпеку для здоров'я населення. Єдиний висновок, який можна зробити на основі такого порівняння — це не зовсім коректно вказати на добову активність населення.

Однак чи можна отримати більш об'єктивну інформацію про найзабрудненіші міста світу, якщо ми поранжуємо міста на основі середніх концентрацій за весь день? Знову ні. Тому що в місті А з потужними викидами протягом дня йшов дощ, у місті Б був сильний вітер, а в місті В з незначними викидами був штиль і температурна інверсія. І які б великі викиди не були в місті А, все одно найзабрудненішим у цей день стане місто В лише тому, що в місті А погодні умови були дуже сприятливими для виведення домішок, тоді як у місті В незначні надходження забруднення накопичувалися і не розсіювалися. Отже, концентрації забруднюючи речовин не дають реальну картину викидів та небезпеку для населення, що проживає в містах.

Зі сказаного вище стає зрозумілим, що порівнювати між собою забруднення в різних містах можна лише на основі досить тривалих спостережень з такою кількістю значень у вибірці, щоб вона задовольняла умови статистичної значущості. Фактично ЗМІ, поширюючи такі «новини», дають суспільству аматорську, абсолютно необ'єктивну інформацію, яка не відображає реального стану речей, а спрямована лише збільшення кількості переглядів. І проблема полягає не лише в часових рамках порівняння. Всесвітня метеорологічна організація висуває цілу низку вимог до методів вимірювання вмісту забруднюючих речовин, а також до використання інформації, отриманої від рекомендованих наземних приладів і low-cost сенсорів, чи супутникових даних. Проте нерідко цих вимог не дотримуються, а дані про перевищення надходять з грубими порушеннями об'єктивності проведення вимірювань.

Історичний розвиток України разом з розвитком видобування корисних копалин та загалом усієї промисловості сприяв формуванню достатньої кількості антропогенних джерел викидів забруднюючих речовин на її території. Промислове виробництво зазвичай тяжіє до місць видобування корисних копалин. Як результат, у всьому світі найбільш потужні стаціонарні джерела антропогенних викидів розміщені поблизу виробництв видобувної промисловості. Іншим фактором, який впливає на локалізацію потужних підприємств, є просторовий розподіл населення та близькість до водних об'єктів. Необхідність виробництва в достатній кількості тепла та електроенергії сприяє тому, що найпотужніші ТЕС / ТЕЦ розташовані так, щоб оптимально покривати територію країни. Тому в тих чи інших містах (а інколи і селах) концентруються потужні підприємства, які стають одни-

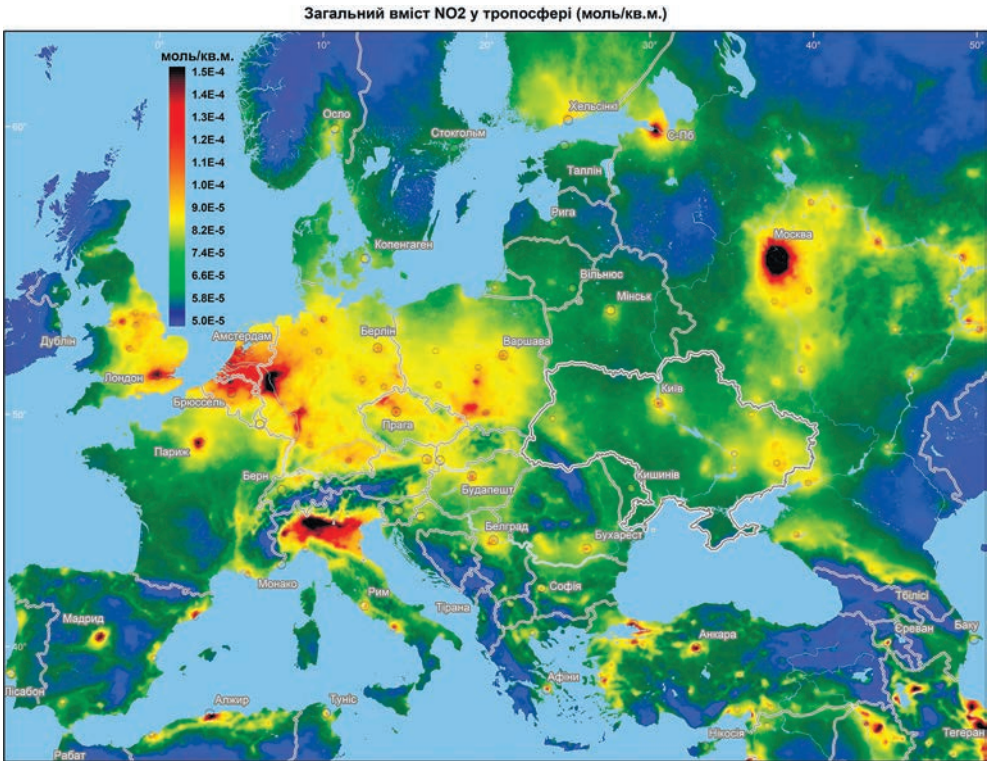


Рис. 3.45. **Просторовий розподіл середніх значень загального вмісту NO_2 у тропосфері над територією Європи за 2019—2021 роки**

ми з найбільших антропогенних забруднювачів регіонального рівня. Поряд із розвитком промисловості на забруднення атмосферного повітря значною мірою впливає кількість та густота населення, яка напряму пов'язана з інтенсивністю використання автотранспорту. В останні десятиліття саме автотранспорт стає вагомим джерелом забруднення в багатьох країнах світу. Є також багато інших факторів формування потужних осередків антропогенних джерел викидів, таких як роль країни як транспортного хабу, інтенсивність морських перевезень, економічна стабільність, спроможність політичних інституцій забезпечити екологізацію виробництва тощо. Все це приводить нас до висновку, що нинішнє забруднення атмосферного повітря та просторово-часовий розподіл забруднюючих речовин визначається фактично діяльністю людства і лише частково коригується метеорологічними умовами та природними джерелами викидів.

На рис. 3.45 наведено просторовий розподіл середнього вмісту NO_2 у тропосфері за період з 2019 по 2021 рік. Як досить універсальний індикатор активності багатьох джерел викидів вміст NO_2 дозволяє в цілому оцінити рівень забруднення та порівняти між собою якість атмосферного повітря

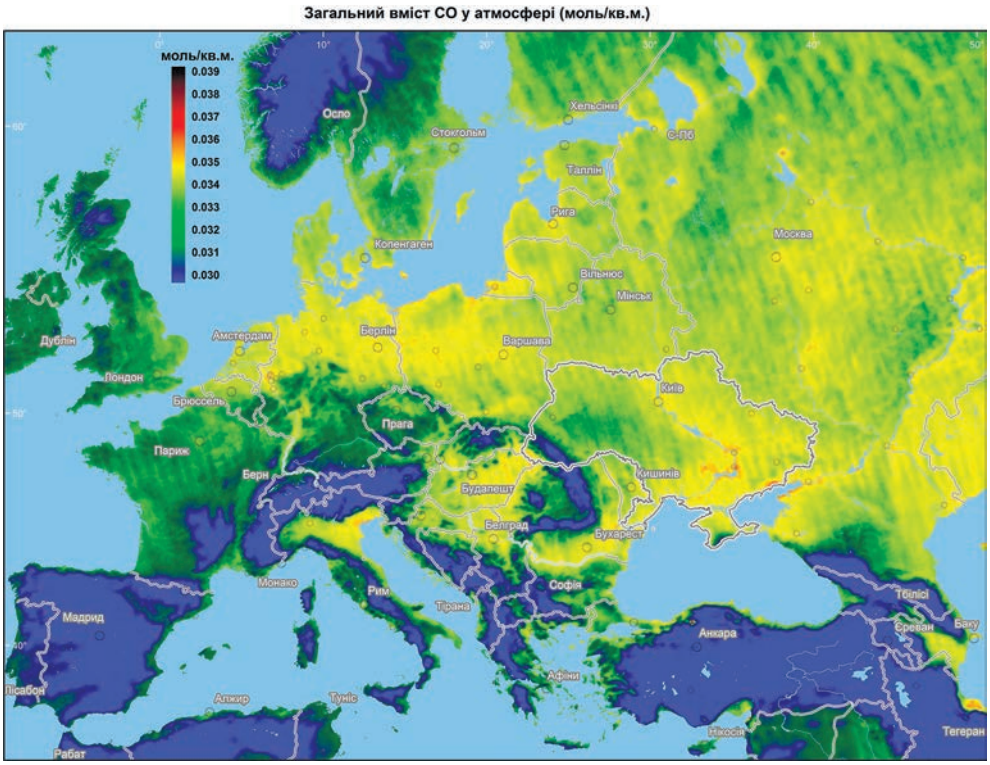


Рис. 3.46. Просторовий розподіл середніх значень загального вмісту CO в атмосфері над територією Європи за 2019—2021 роки

різних країн. Крім того, рис. 3.45 наочно спростовує величезну кількість «новин» про те, що міста України є дуже забрудненими і потрапляють до списку найзабрудненіших міст світу. Вони такими не є навіть порівняно з територією Європи, яка набагато чистіша за країни Азії.

Кризові для економіки України 1990-ті роки привели до суттєвого поліпшення якості атмосферного повітря. Занепад частини виробництва, навіть у промислово розвинених районах Донбасу, зумовив ситуацію, коли викиди від найбільших українських ТЕС / ТЕЦ та промислових центрів стали набагато меншими, ніж від промислових районів Польщі, Німеччини та деяких інших країн. Це добре видно з просторового розподілу загального вмісту NO_2 у тропосфері (рис. 3.45). Незважаючи на величезні зусилля, яких доклали країни ЄС для поліпшення якості автомобільного пального, густота населення та кількість машин в Європі настільки великі, що викиди від автотранспорту в Німеччині, країнах Бенілюксу, на півночі Італії, у Великій Британії, а також у таких великих містах, як Париж, Мадрид, Барселона, Рим, Неаполь, Прага та ін. значно перевищують викиди у Києві. І це при тому, що Київ сильно потерпає від викидів автотранспорту, особливо у години «пік».

Найвищі ж концентрації NO_2 спостерігаються в Москві, де середній вміст перебуває на рівні пікових значень для Києва. Найменші рівні NO_2 характерні для більшої частини Швеції та Норвегії. Вміст NO_2 там порівняний із фоновим вмістом в Українських Карпатах. Загалом, для усіх гірських систем на території Європи характерні мінімуми загального вмісту NO_2.

Ситуація із загальним вмістом CO в атмосфері в деяких містах України дещо гірша порівняно з містами Європи. Маріуполь, до початку масованих бомбардувань збройними силами РФ у 2022 році, характеризувався найвищим вмістом CO серед усіх міст Європи (рис. 3.46). З огляду на те, що під час блокади Маріуполя всі великі промислові об'єкти було знищено, надалі такого вмісту CO вже не спостерігатиметься. Ще над кількома містами, зокрема Дніпром, Запоріжжям, Кривим Рогом, а також над групою Марганець — Нікополь — Енергодар, вміст CO є досить високим порівняно з іншими країнами Європи. Подібні осередки простежуються і над промисловими районами Польщі та Німеччини. Високий вміст CO спостерігається на промислових об'єктах, що працюють на твердому паливі, а також на ТЕС, які спалюють вугілля. У Європі формування осередків зі значними викидами CO пов'язане насамперед із розвитком видобувної промисловості.

На сьогодні не відомо, чи залишаться в майбутньому такі осередки високого вмісту CO в українських промислових містах, оскільки одним із наслідків російсько-української війни може стати занепад промисловості, що в історичному розрізі буде продовженням кризових умов, які тягнуться з 1990-х років. Звичайно, це приведе до перерозподілу осередків високого вмісту забруднюючих речовин в атмосферному повітрі в масштабах не лише України, а й всієї Європи. Детальніше про роль війни у зміні поля забруднення атмосферного повітря в Україні йдеться нижче.

Більш детальне порівняння забруднення атмосферного повітря здійснено за сезонами на прикладі 2021 року (рис. 3.47). Для аналізу та порівняння з Україною обрано Німеччину, як одну з найбільш забруднених NO_2 країн, та Швецію, як одну з найбільш чистих країн Європи. Виявляється, що забруднення території України на фоні цих країн далеко не найгірше. Втім, важливо розуміти, що такі рівні забруднення все одно небезпечні для здоров'я населення та негативно впливають на природні екосистеми. Незважаючи на те, що стан забруднення атмосферного повітря в Україні посідає проміжну позицію між найчистішими та найзабрудненішими регіонами Європи, заходи з поліпшення якості атмосферного повітря залишаються вкрай актуальними. В ідеалі метою є досягнення в Україні таких рівнів забруднення атмосферного повітря, які є на сьогодні в країнах Скандинавського півострова.

Незалежно від сезону року загальний вміст NO_2 у тропосфері на території Німеччини вищий, ніж в Україні. Найбільш забрудненим районом є Рурський вугільний басейн, в якому вміст NO_2 сягає $1{,}5 \cdot 10^{-4}$ моль/м^2 і

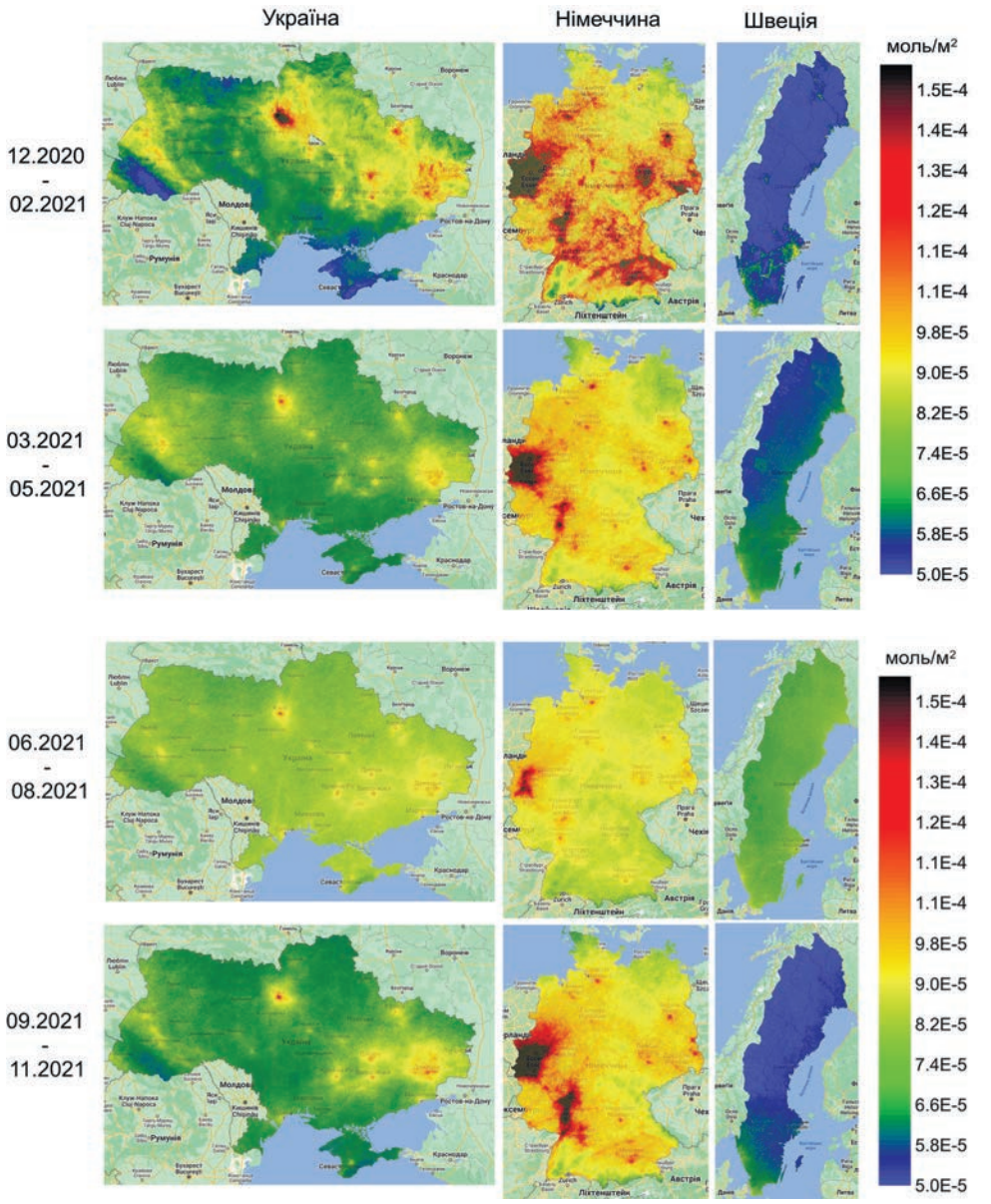


Рис. 3.47. Порівняння середніх сезонних значень загального вмісту NO_2 у тропосфері в Україні, Німеччині та Швеції у 2021 році (обчислення та візуалізацію реалізовано в Google Earth Engine)

впродовж усього року перевищує рівень забруднення промислових міст Донецької області (рис. 3.47). Причому на території України лише взимку забруднення в Києві зіставне з середніми значеннями у Рурському басейні протягом будь-якого сезону року. Забруднення в Українських Карпатах, Кримських горах, на більшій частині Причорноморської низовини, Поліссі та Подільській височині взимку перебуває в межах 5,0—6,0·10^{-5} моль/м^2, що близько до рівнів забруднення у Швеції. У Німеччині подібних середніх мінімумів не спостерігається взагалі. Загалом зима є сезоном контрастів вмісту NO_2 між забрудненими містами та чистими районами.

З підвищенням температури повітря починають зникати настільки різкі відмінності між забрудненими та чистими районами. Найбільш однорідного розподілу загальний вміст NO_2 досягає влітку і варіює в межах 6,5—8,5·10^{-5} моль/м^2. Літній сезон є єдиним, коли вміст NO_2 у Німеччині стає порівняно близьким до його вмісту в менш забрудненій Україні та найбільш чистій Швеції. Протягом осіннього сезону, контрасти у просторовому розподілі NO_2 починають зростати. Однак, коли восени переважна більшість території України характеризується вмістом NO_2 від 6,5·10^{-5} до 1,0·10^{-4} моль/м^2, на території Німеччини середні значення перевищують 1,0·10^{-4} моль/м^2. Водночас у Швеції вміст NO_2 досягає 6,5·10^{-5} моль/м^2 тільки на півдні країни, де значну роль відіграє перенесення забруднення з території Данії.

Розділ 4

НАСЛІДКИ ПОВНОМАСШТАБНОГО ВТОРГНЕННЯ РФ НА ТЕРИТОРІЮ УКРАЇНИ

24 лютого 2022 року розпочалося російська збройна агресія проти України. Бойові дії супроводжувалися масштабними обстрілами з артилерії і систем залпового вогню, займаннями враженої техніки, що призводило до великих пожеж на територіях лісових масивів і лучно-степових угідь. Найбільш інтенсивні займання зафіксовано 26 і 28 лютого, 11 та 14—30 березня, а особливо потужні — 23, 24, 26, 28 і 29 березня. Супутникові спостереження за тепловими аномаліями і концентрацією домішок у повітрі дозволяють встановити об'єктивну картину в режимі, близькому до реального часу.

Супутникові дані дають змогу оцінити масштаби пожеж, їх шкідливий вплив, а також отримати вихідні дані для підрахунку збитків, заподіяних пожежами. Крім того, є можливість ідентифікувати пожежі, визначити райони активних бойових дій. Така інформація є важливою, оскільки, нехай і опосередковано, але з мінімальним узагальненням вказує на ділянки, небезпечні як для цивільного населення, так і для фахівців ДСНС України, які відповідають за ліквідацію пожеж, а тому ці дані щоденно надаються відповідним службам. Класифікація займань значною мірою підвищує ефективність і якість інформування, але для цього потрібно відокремити пожежі, що вникли внаслідок бойових дій, від решти пожеж, причинами яких є господарська діяльність людини і необережне поводження з вогнем. Оскільки територія навколо пожеж, спричинених воєнними діями, становить загрозу через можливу наявність нерозірваних боєприпасів, ці займання ліквідуються в дещо інший спосіб, ніж звичайні пожежі.

На рис. 4.1 показано лісові пожежі, зафіксовані у другій половині дня 22 березня 2022 року. Можна помітити, що займання в лісових масивах відбувалися не лише в Київській і Донецькій областях, де в той період точилися найзапекліші бої, а й у Львівській і Закарпатській областях, які майже не постраждали від російського вторгнення в перші місяці війни.

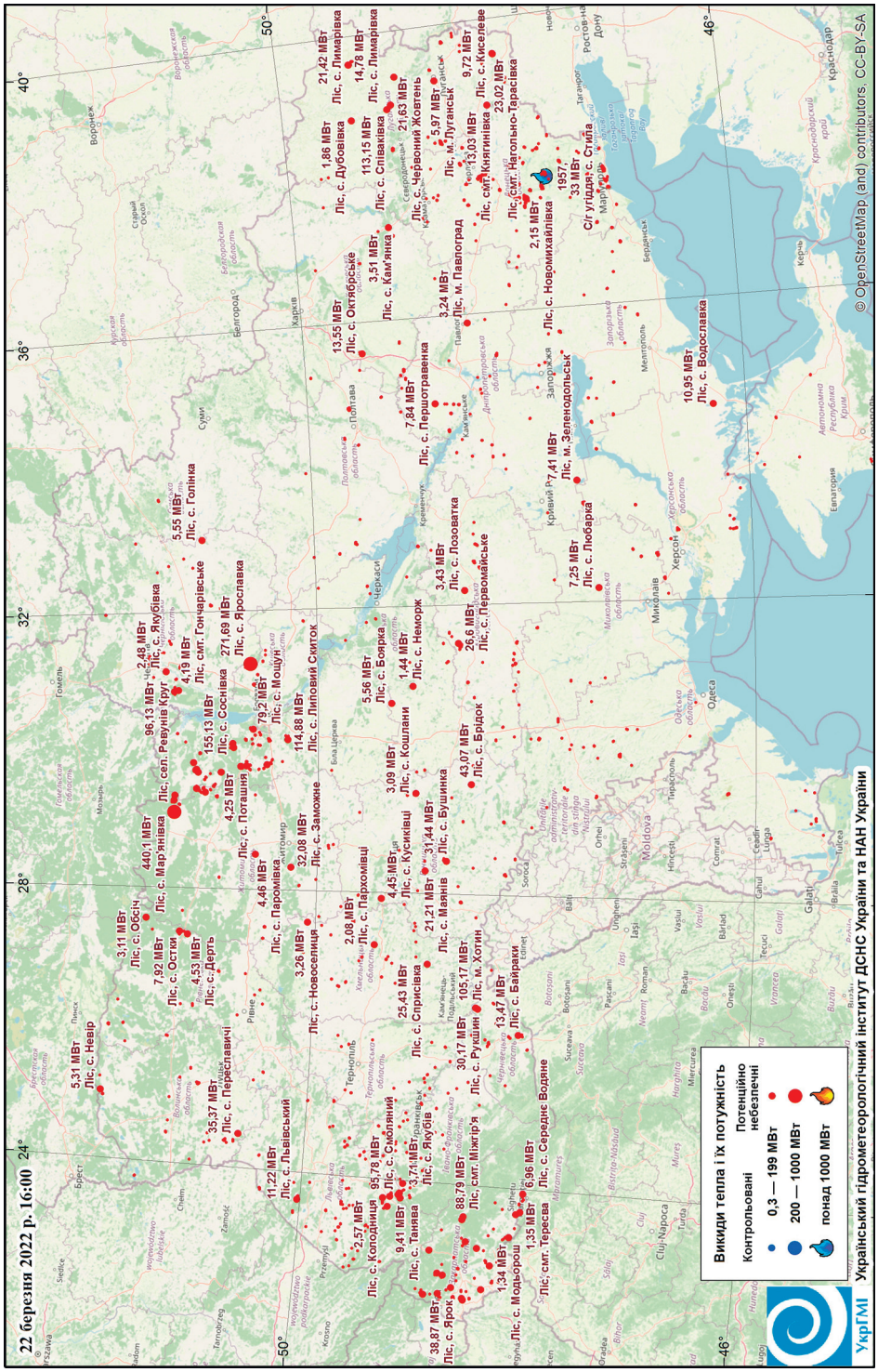


Рис. 4.1. Карта лісових пожеж станом на другу половину дня 22 березня 2022 року

Окремий інтерес становить порівняння забруднення атмосферного повітря в певні часові інтервали в довоєнні роки з аналогічними періодами 2022 року. Результати цього дослідження наведено в підрозділі 4.3.

4.1. Дешифрувальні ознаки пожеж, що виникли внаслідок бойових дій

Дешифрування пожеж за результатами супутникових спостережень — це їх виявлення, визначення типу й характеристик (тривалість горіння, контури осередків пожежі), взаємного розміщення викидів тепла. До дешифрування не належить визначення потужності пожежі, оконтурення її по зовнішніх викидах тепла, розрахунок площі, визначення матеріалу горіння, оскільки ці характеристики можуть обраховуватися за допомогою геопросторових операцій. Дешифрування пожеж має на меті встановлення таких характеристик пожежі, які вказують на її походження, особливості виникнення, передусім на тип пожежі. Увагу слід також приділити вказівкам на подальшу формалізацію процесу дешифрування, щоб автоматична система моніторингу могла взяти на себе значну частину операцій з опрацювання щоденних спостережень.

До дешифрувальних ознак належать:

- взаємне розміщення викидів тепла в межах контуру пожежі;
- форма контуру пожежі;
- сумарна потужність викидів тепла в межах контуру (інтенсивність горіння);
- матеріал горіння (деревина, трав'яниста рослинність, стерня тощо);
- час виникнення і тривалість пожежі.

Пожежі від бойових дій посідають особливе місце серед ландшафтних пожеж, які фіксуються на території України, починаючи з листопада 1999 року. З початку російської широкомасштабної воєнної агресії проти України внаслідок бойових дій виникла велика кількість пожеж на різних ландшафтах. 15 квітня 2022 року Державна екологічна інспекція України створила при Оперативному штабі робочу групу, що було затверджено відповідним наказом № 78/1. Завданням цієї робочої групи є розроблення методичних документів і порядку визначення шкоди та нарахування збитків, завданих природним ресурсам та навколишньому природному середовищу внаслідок збройної агресії РФ. Воєнні дії можуть завдавати шкоди різним складовим навколишнього середовища: біорізноманіттю, ґрунтам, поверхневим водам тощо (всього понад 7 компонентів). Однак за допомогою аналізу викидів тепла можна оцінити шкоду для атмосферного повітря, ландшафтів і лісових угідь. Тобто можна перевести потужність горіння в обсяг згорілого матеріалу і, відповідно, отримати площі спаленої місцевості та об'єми шкідливих речовин, які потрапили в атмосферне повітря.

Ще одною небезпекою під час військових операцій є піротероризм — загроза лісових пожеж, спричинених підпалами, як майбутня терористична зброя [96]. У цьому разі лісові пожежі є не наслідком, а «зброєю помсти», призначеною для відплати за програну війну, що робить цей матеріал ще більш актуальним. Наприклад, у роботі [97] розглянуто історію випадків і стратегій знищення навколишнього середовища. В ній проаналізовано десятки подій — від знищення святих місць до перетворення території на непридатну для проживання на багато років наперед унаслідок використання дефоліантів.

Під час написання цієї монографії було розглянуто велику кількість статей, що дозволяє зробити кілька висновків про стан вивчення питання.

По-перше, моніторингом пожеж займалися чимало вітчизняних організацій та окремих авторів. Це Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» [98], Військовий інститут Київського національного університету імені Тараса Шевченка [24], Національний університет біоресурсів і природокористування України [99], Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України [26, 100] та інші державні установи і приватні компанії [85]. Цьому сприяла загальнодоступність і відкритість даних космічного моніторингу та відносно нескладна технологія їх опрацювання. З кінця 1999 року, коли NASA запустило перший супутник із термосканером, опубліковано кілька десятків вітчизняних робіт і кілька сотень праць зарубіжних авторів. Перша в Україні стаття [102] вийшла в 2002 році. Деякі автори узагальнили наукові результати, досягнуті у цій сфері [5]. Одною з найкращих є праця [1], в якій наведено розгорнуту класифікацію методів виявлення і спостережень за лісовими пожежами: супутникові, оптичні (прямого візуального контакту), опосередковані (виявляють пожежі за їх наслідками — димом, викидами домішок у повітря), дистанційні сенсорні прямого контакту. Однак аналіз цих досліджень дає можливість зробити висновок, що централізованої і відкритої системи моніторингу пожеж в Україні немає, оскільки розпорошені зусилля окремих організацій і авторів не привели до створення серйозного багатофункціонального продукту, здатного конкурувати з іноземними аналогами і повністю задовольняти вітчизняного користувача. До категорії досліджень з моніторингу пожеж слід віднести також також роботи, які описують природу самих лісових, причини їх виникнення, що може бути корисним для розуміння викладених далі результатів. Наприклад, у статті [103], крім методики моніторингу торфовищ, розглянуто причини виникнення торф'яних пожеж (80—90 % усіх торф'яних пожеж спричинює людський фактор, решта 10—15 % пожеж можуть виникати від блискавок, транспорту, що проїздить мимо, та в результаті самозаймання торфу).

По-друге, наявність у відкритому доступі інформації про особливості функціонування супутників із термосканерами зумовила появу статей, в

яких описано технологію отримання і опрацювання даних щодо теплових аномалій, спричинених пожежами, особливості функціонування як супутникової системи моніторингу пожеж загалом, так і окремих її елементів. Таких праць дуже багато, а вибрані статті становлять цінність для глибшого розуміння проблеми. У роботі [24] коротко викладено особливості космічного моніторингу ландшафтних пожеж за допомогою інструмента FIRMS (Fire Information for Resource Management System). У статті [104] наведено дуже детальний опис основних характеристик космічного апарата Suomi NPP та його сканерів і порівняно їх зі сканерами апаратів NOAA, Aqua і Terra. Є матеріали, які стосуються просторово-часового аналізу розподілу викидів тепла і пожеж [105, 106]. З іншого боку, автори статті [103] для аналізу пожеж на торфовищах, які мають високі ризики загоряння, використовували багатоспектральні дані супутників серії Landsat 4-8 Європейського космічного агентства з розрахунками відтвореної температури земної поверхні в тепловому діапазоні. На жаль, періодичність зйомки (16 діб) тоді була невисокою, тому в поєднанні з не завжди сприятливими погодними умовами використання супутників серії Landsat 4-8 було недоцільним. Методику детектування осередків пожеж і визначення їх потужності та інших характеристик добре викладено у статті [107].

По-третє, більш важливими, але нечисленними є роботи з дослідження пожеж, що виникли внаслідок воєнних дій. Зокрема, стаття [108] описує лісові пожежі в провінції Дерсім у Туреччині та їх залежність від активності бойових дій. У ній використано мультидисциплінарний підхід, який поєднує методи якісного аналізу повідомлень у друкованих ЗМІ та соціальних мережах з кількісними методами, такими як дистанційне зондування Землі і просторовий аналіз. Це дозволяє краще зрозуміти роль збройного конфлікту в потенційному посиленні частоти та серйозності лісових пожеж. Хоча точно визначити причину кожної пожежі неможливо, результати дослідження свідчать про наявність тісного зв'язку між пожежами та інтенсивністю збройного конфлікту в турецькій провінції Дерсімі, вказуючи на те, що частота конфліктів загалом корелює з кількістю пожеж. Є також більш фундаментальні праці [109, 110], в яких детально проаналізовано наслідки війни для навколишнього середовища. Метою огляду [111] є вивчення конкретних впливів сучасної війни (тобто воєн з початку XX століття) на структуру і функціонування екосистеми, особливо на біорізноманіття, статус популяцій і біологічних спільнот).

Крім того є розширені дослідження, створені структурними підрозділами університетів. Так у статті [112] розглянуто виведення пожежних сигналів із сигналів теплових аномалій, обробку рядів супутникових знімків для створення точної карти пожеж, щомісячне картографування пройдених вогнем територій і оцінювання частки лісових пожеж у загальній кількості природних пожеж. У ній детально викладено методику оцінювання площ

пожеж, показано збільшення кількості пожеж, зокрема й лісових, унаслідок бойових дій, але не наведено методи класифікації пожеж, їх розподілено лише в часовому аспекті на до та після 2014 року. Важливим є алгоритм оцінки площ лісових пожеж за згарищами, а не за контурами теплових аномалій, що є більш прогресивною технологією. Також підраховано кількість пожеж — упродовж 2013—2018 років на тимчасово окупованих територіях Донецької та Луганської областей сталися 4 314 пожежі, з них 255 — лісові [112, с. 16].

Наукових публікацій про пожежі, які виникли в Україні після 24 лютого 2022 року, практично немає, за винятком [113], в якій головну увагу зосереджено на екологічному аспекті, без спроби кількісно оцінити їх вплив. Є ще низка статей, які містять важливу інформацію, зокрема дані про кількість і площу, пройдену пожежами, які відбулися до 2022 року [14, 99]. Вони становлять «базис» для порівняння з кількістю пожеж, які виникли після 24 лютого на території України.

Однак зовсім немає робіт, які давали б змогу вирішити актуальне на сьогодні завдання з виявлення пожеж, спричинених бойовими діями, використовуючи при цьому супутникові знімки, оскільки інші методи збору інформації недоступні через високу інтенсивність бойових дій. Чітких критеріїв для таких пожеж до сьогодні сформовано не було. Отже, ми ставили собі за мету знайти дешифрувальні ознаки, характерні для саме для пожеж, що виникли внаслідок бойових дій і були зафіксовані термосканерами супутників.

Дослідження проводили за такою методикою. Аналіз пожеж за результатами супутникового сканування було розпочато у квітні 2020 року, коли трапилися великі лісові пожежі у Зоні відчуження Чорнобильської АЕС. Впродовж 2020—2022 років накопичено певний досвід їх опрацювання. З 24 лютого 2022 року щодня пожежі від бойових дій порівнювали з раніше отриманими результатами, які охоплюють весь період супутникових спостережень з січня 2000 року. Підсумки було підбито в середині вересня 2022 року.

Для визначення осередків горіння та інтенсивності виділення тепла в них під час лісових пожеж у квітні 2020 року ми використовували дані спостережень із чотирьох супутників Terra, Aqua, Suomi NPP і NOAA-20. Архівні дані про активні пожежі на території України було взято з сайту FIRMS. Ці дані містять географічні координати викиду тепла, час і дату його фіксації, назву супутника, потужність викиду тепла, достовірність даних та деякі інші технічні параметри. Для радіометрів MODIS або VIIRS, встановлених на різних супутниках, ці дані відрізняються, хоча фактично є результатом спостережень однієї і тієї ж самої території. Проте ця різниця невелика [105, 106].

Викиди тепла, зафіксовані одним супутником, об'єднували в один осередок, якщо відстань між ними була менше, ніж 2 км (саме таке значення

відстані встановлено емпірично). Контур осередку проводили по крайніх термоточках масиву і підраховували його площу та сумарну потужність всіх викидів тепла, які потрапляють до нього. Для осередку окреслювали буфер радіусом 1 км (саме він відображений на всіх наведених нижче картах).

Дані про викиди тепла, зафіксовані на створених у такий спосіб картах, ми намагалися доповнювати відповідною інформацією з новин та постів у соціальних мережах, встановлювали закономірності, характерні для різних пожеж і різних умов їх виникнення та поширення. Потім карти, складені після 24 лютого 2022 року, тобто після початку активних бойових дій, порівнювали з набором карт великих лісових пожеж за весь попередній період супутникових спостережень. Крім того, з використанням актуальних космічних знімків середньої роздільної здатності, наявних на ресурсі FIRMS, за димовим шлейфом підтверджували виявлені великі осередки пожеж.

Результати цього дослідження наведено нижче, але передусім слід зазначити, що викиди тепла розміщуються не на місці осередків пожежі, а в центрі комірок повернутої на певний кут регулярної віртуальної матриці, індивідуальної для кожного супутника, яка утворюється під час сканування земної поверхні. Частково це було описано у попередніх розділах, однак потребує уточнення. На рис. 4.2*а* зображено займання на полі біля с. Семиполки Броварського району Київської області. І хоча це займання виникло на сільськогосподарському угідді, воно відображається і на території населеного пункту. Займання є витягнутим вздовж напрямку сканування, можливо має кілька невеликих неінтенсивних осередків через незначну кількість горючого матеріалу. Ймовірно, на полі горять залишки стерні або бур'яни. Викиди тепла на рис. 4.2*б* створюють ілюзію їх розміщення на місці найбільших осередків, деякі з яких потрапляють на поверхню відкритої водойми, чого, звісно, не може бути. Реально ж осередок займання зміщений північніше і східніше на 20—200 м і знаходиться на березі.

Далі наведемо критерії, за якими можна виділити пожежі, що виникли внаслідок бойових дій.

Критерій 1. Нетипові для виникнення пожеж ділянки, на яких пожежі не фіксувалися впродовж усього періоду супутникових спостережень. До таких ділянок належать території населених пунктів, особливо великих і середніх міст. У разі фіксації багатьох викидів тепла з високою ймовірністю можна казати про обстріл населеного пункту. На рис. 4.3 більша частина викидів тепла розміщена в центрі м. Бахмут. Незважаючи на те, що один з викидів тепла потрапляє на зруйновану ще до початку бойових дій ТЕЦ, кількість викидів тепла і раптовість їх появи, а також відсутність поруч природних горючих матеріалів і розташування поряд із зоною бойових дій вказує саме на займання від обстрілів.

Проте є виняток — території, на яких періодично фіксуються займання: металургійні, коксохімічні та цементні заводи (щодня); рекреаційні і

а

б

Рис. 4.2. Особливості розміщення викидів тепла: *а* — чітко вздовж лінії сканування; *б* — накладення викидів тепла за даними кількох супутників

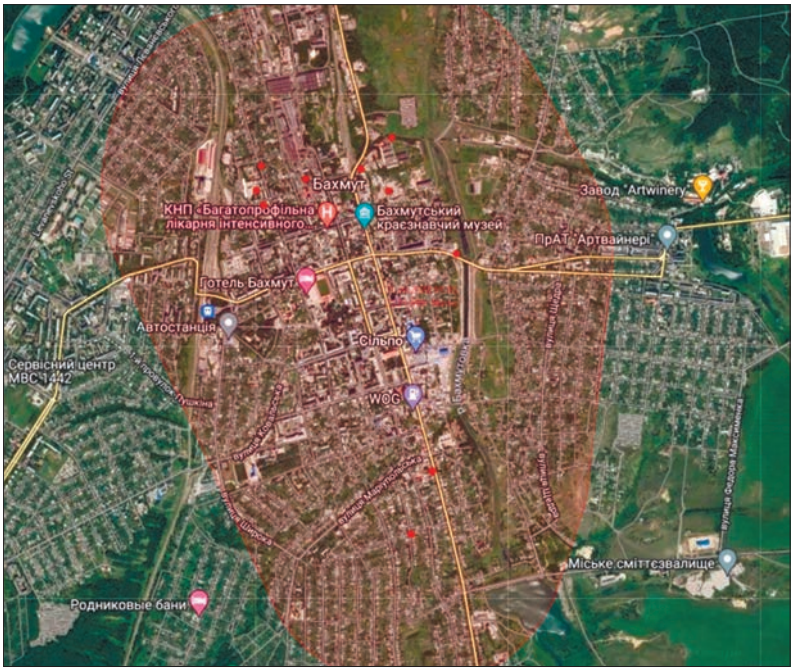


Рис. 4.3. Викиди тепла у м. Бахмут станом на 31 серпня 2022 року

заповідні території (осінь, весна, літо); лісові масиви з вирубаними ділянками (літо, осінь); сміттєзвалища, території поблизу нафтопереробних заводів, ферми (часто у вихідні дні); сільськогосподарські угіддя після збору врожаю і під час підготовки до посівної, окремі луки й заболочені території (липень, серпень, жовтень, березень). Як правило, займання на цих територіях не є ознакою бойових дій. Швидше, навпаки, відсутність діяльності на територіях заводів може вказувати на бойові дії і пошкодження самих підприємств та комунікацій.

Критерій 2. Займання, які охоплюють території з різним типом землекористування. Поєднання сільськогосподарських угідь, лук, забудованих територій і лісів без чіткого домінування якогось одного типу, як правило, означає наявність певної, досить потужної сили, що спричинила ці займання і відмінна від господарської діяльності людини. У березні 2022 року (22, 23 і 28 числа) зафіксовано найбільші за інтенсивністю займання поблизу Києва, які охопили різні за призначенням землі (рис. 4.4), і саме в ці дні під Києвом точилися запеклі бої. На користь походження цих займань від бойових дій свідчать їх розташування і потужність.

Критерій 3. Неправильна форма контурів займання. Як правило, навіть потужні займання, спричинені природними або цивільними техногенними чинниками, мають овальну чи заокруглену, тобто правильну, форму.

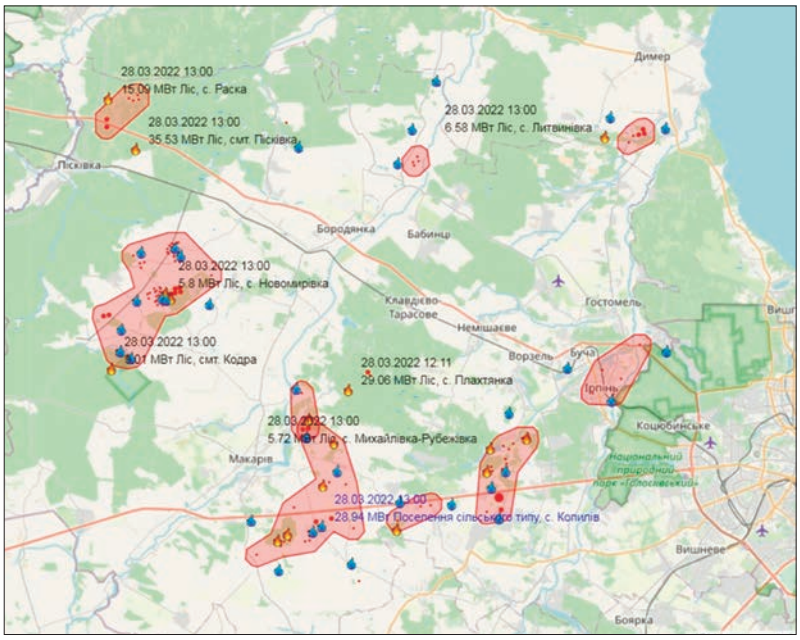


Рис. 4.4. Території з різним типом користування, охоплені займаннями в поєднанні з неправильними контурами пожеж та їх кількістю

Рис. 4.5. Витягнуте вздовж однієї осі займання під час обстрілу м. Донецьк в ніч на 11 серпня 2022 року

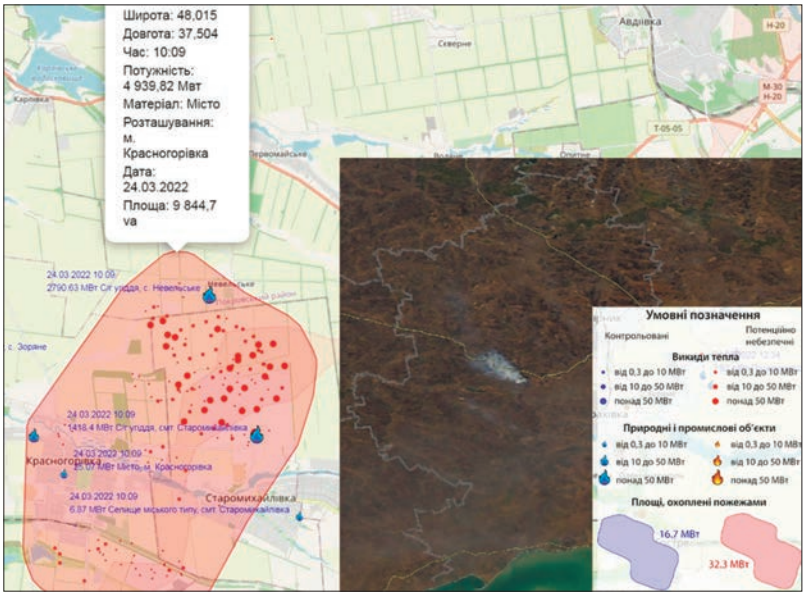


Рис. 4.6. **Потужне займання біля зони розмежування з тимчасово окупованою частиною Донецької області. На врізці показано актуальний космічний знімок із димовим шлейфом від пожежі**

Округла форма характерна для пожежі, яка виникла з одної або кількох близько розміщених точок і поширюється природним чином. Займання від обстрілів у багатьох випадках має лінійну, сильно витягнуту або трикутну форму (рис. 4.4 і 4.5).

Критерій 4. Надто потужне займання (рис. 4.6) або велика їх кількість (рис. 4.3), що не є характерним для певної території, або невідповідність часу виникнення займання. Слід наголосити, що не можна під час бойових дій усі пожежі механічно відносити до тих, що виникли внаслідок обстрілів. Таке визначення потрібно проводити з урахуванням логіки і, бажано, кількох підтверджувальних факторів. Зокрема, пожежа в Одеській області (рис. 4.7) ймовірно має господарське походження.

Критерій 5. Займання в нетиповий для певної території час. Для сільськогосподарських угідь це весь рік, крім березня, липня, серпня і жовтня; для природних рекреаційних територій — частина року з жовтня по квітень включно.

Критерій 6. Одночасне виникнення займань у кількох населених пунктах (рис. 4.8). У багатьох промислових містах, у яких розміщуються великі металургійні, коксохімічні або хімічні підприємства, зокрема у Кривому Розі (Криворіжсталь), Запоріжжі (Запоріжсталь), Макіївці (Макіївський металургійний завод), Алчевську (Алчевський металургійний комбінат),

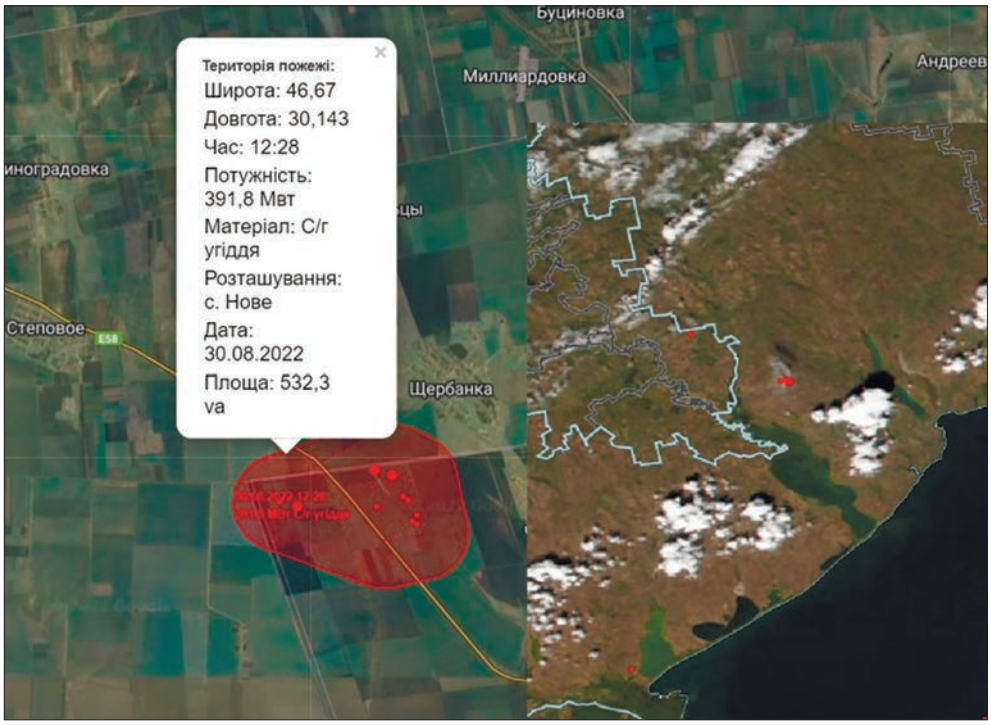


Рис. 4.7. Займання в Одеській і задимлення від нього на космічному знімку

викиди тепла фіксують щодоби. Вони не є наслідком воєнних дій, оскільки спостерігаються впродовж усієї історії супутникових спостережень. Однак ці викиди відбуваються на промислових майданчиках і не зачіпають житлову забудову, а тому поява на забудованих територіях одночасно в кількох населених пунктах груп викидів тепла з високою ймовірністю означає обстріл. Проте самі по собі обстріли рідко приводять до займань, особливо в багатоповерхових спорудах. Займання виникають лише в разі пошкодження газопроводів, автозаправних станцій або на територіях із сухою рослинністю, в лісних масивах чи в дерев'яних будівлях.

Слід також виокремити кілька альтернативних критеріїв, що вказують на займання від невійськових (антропогенних або стихійних) причин.

Не можна гарантовано віднести до пожеж, що виникли внаслідок бойових дій, ті займання, які виникають на місцях попередніх досить сильних пожеж. Одним із прикладів є північна ділянка Зоні відчуження ЧАЕС поблизу смт Вільча і с. Зимовище Вишгородського району і с. Шепеличі Іванківського району Київської області. Потужні поклади торфу, а також, імовірно, вирубування лісу, раз на кілька років приводять тут до масштабних займань. Незважаючи на близьке розташування державного кордону з Республікою Білорусь, ці займання мають господарське походження. Зазвичай

а *б*

в *г*

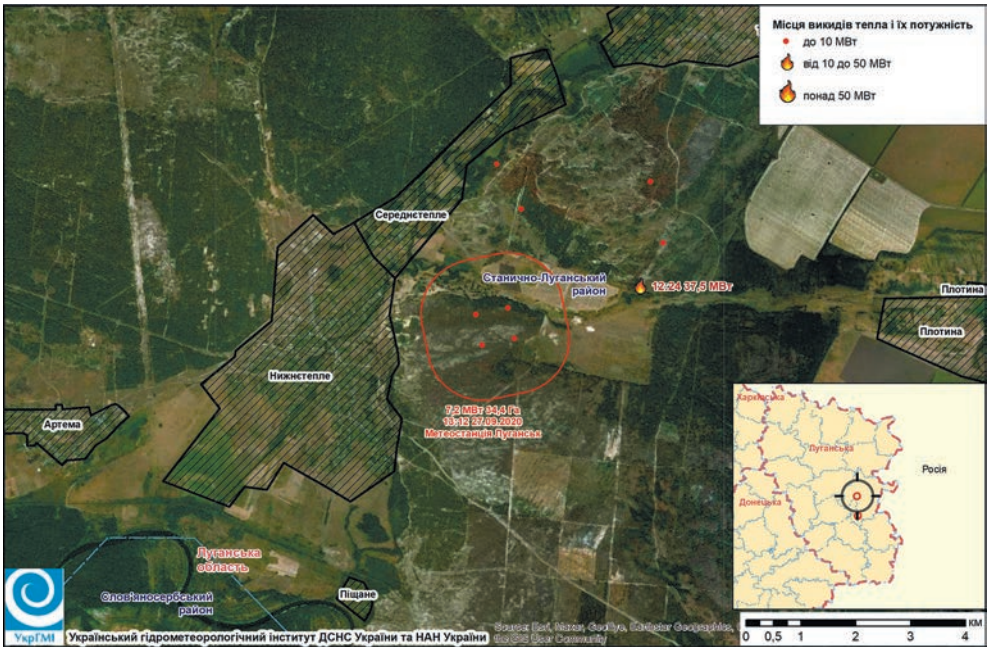
Рис. 4.8. Одночасне займання в кількох населених пунктах уночі 7 вересня 2022 року: *а* — с. Дар'ївка Херсонського району Херсонської обл.; *б* — м. Балаклія Харківської обл.; *в* — м. Снігурівка Баштанського району Миколаївської обл.; *г* — смт Шевченкове Куп'янського району Харківської обл.

займання в цьому місці виникає від тривалого тління і поступово інтенсивність пожежі збільшується. Саме таке поступове і повільне, впродовж кількох днів, наростання пожежі і свідчить про займання з невійськових причин (рис. 4.9 і 4.10).

Не відносимо до пожеж від воєнних дій і ті займання, які виникли на рекреаційних територіях поза зоною активних боїв.

Отже, «неправильність» картографічного вигляду займання і його характеристик (контурів, часу і місця появи), надмірна потужність, велика кількість осередків — усе це є ознаками певної, досить потужної, розпо-

2 вересня 2020 р.



27 вересня 2020 р

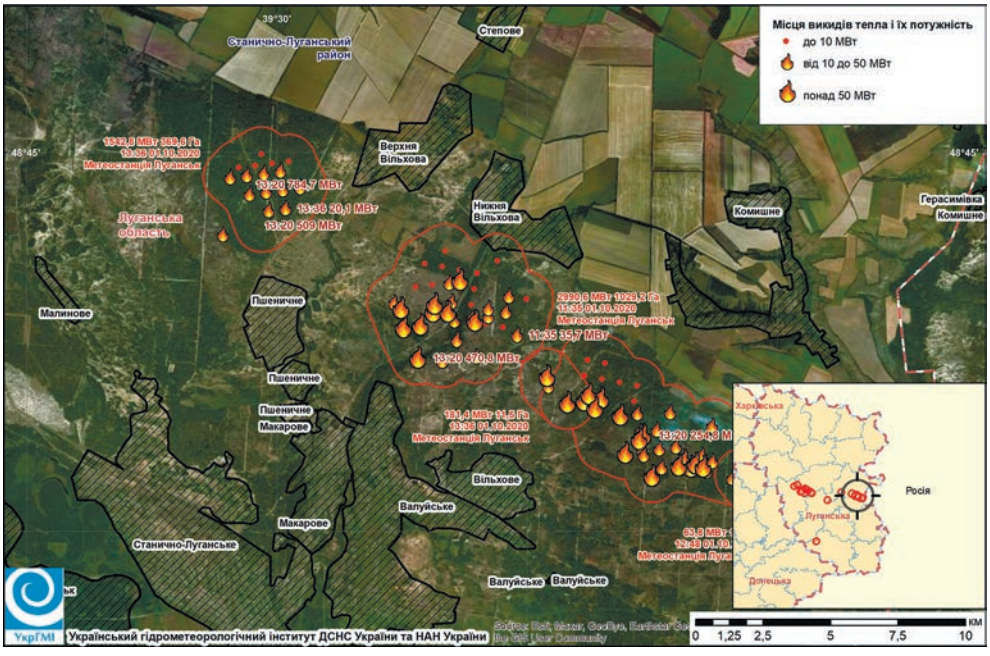
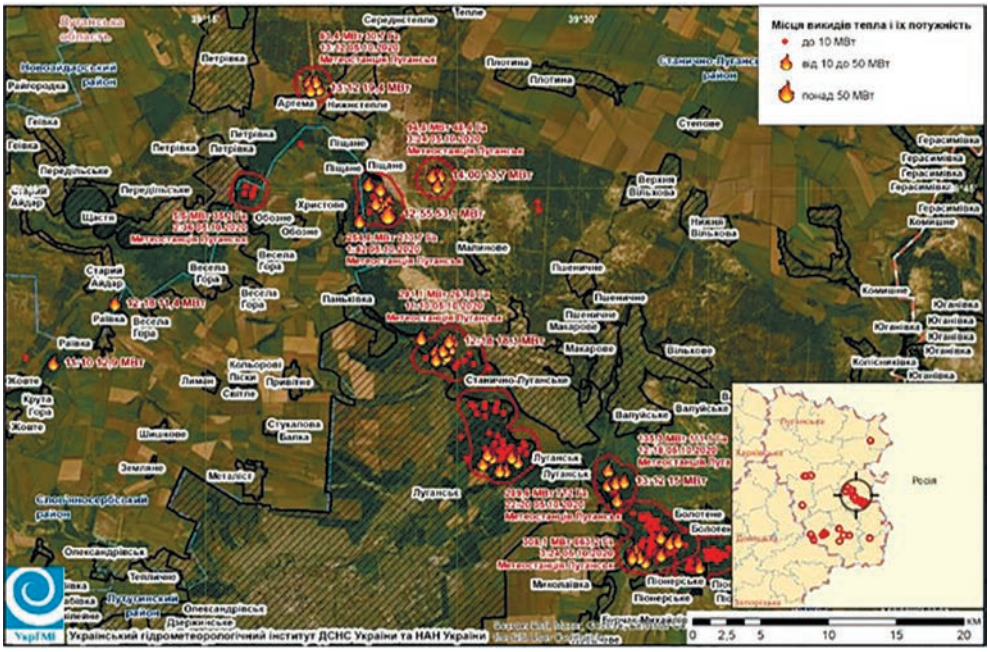


Рис. 4.9. Виникнення пожеж в Луганській області у вересні 2020 року

5 жовтня 2020 р.



6 жовтня 2020 р

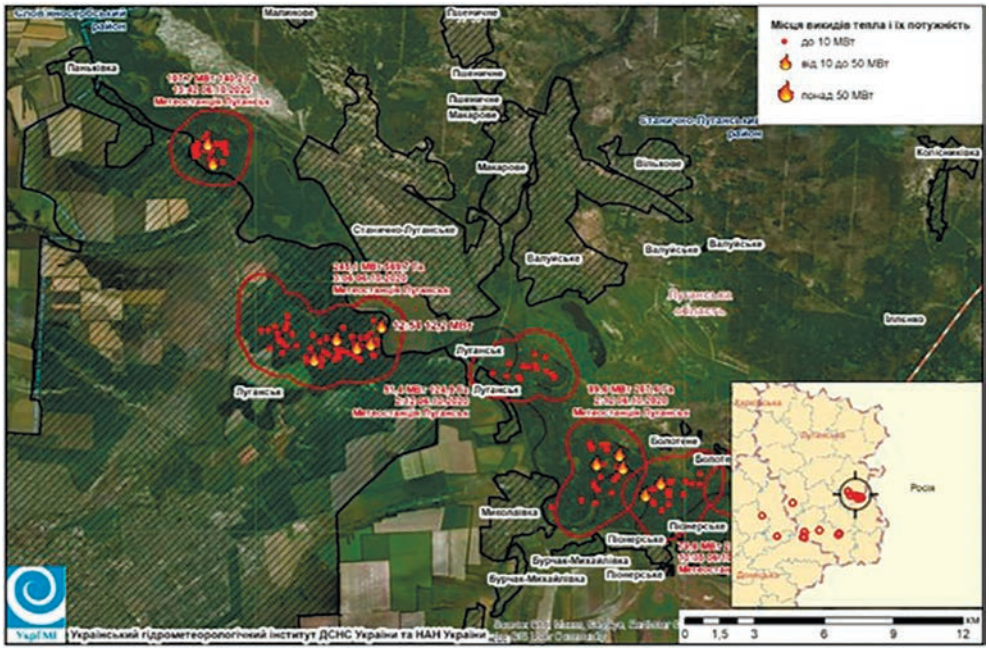


Рис. 4.10. Виникнення пожеж в Луганській області у жовтні 2020 року

діленої на значній площі сили, яка спричинила пожежу. Такою силою часто є вибухи від артилерійського або ракетного обстрілу території. Під час ідентифікації пожеж від бойових дій насамперед слід звертати увагу саме на невідповідності їх виникнення і поширення. По-друге, пожежі від бойових дій, як правило, поєднують у собі кілька критеріїв: неправильність контурів і їх численність (обстріл по кількох площах), нетиповий час виникнення, кілька осередків і потужність займання (наприклад, знищення врожаю), охоплення кількох видів землекористування і відсутність на цих територіях пожеж раніше, впродовж часу спостережень. Крім того, картографічний підхід дозволяє отримати не лише якісні, а й кількісні характеристики пожеж, що дає змогу класифікувати пожежі і визначити їх числові характеристики (площу, потужність, обсяг згорілої рослинності або будівельних матеріалів). У такий спосіб можна підрахувати збитки, завдані довкіллю, зокрема й атмосферному повітрю, як це було зроблено у статтях [114—116].

4.2. Розроблення методики обрахування кількості згорілих матеріалів для оцінки збитків, завданих навколишньому середовищу в результаті бойових дій

Територія України характеризується підвищеною кількістю пожеж порівняно з країнами Євросоюзу [99]. Причинами найбільших з них є спосіб ведення сільськогосподарського виробництва, за якого відходи після збору врожаю спалюють на полях, а також неконтрольовані пожежі, що виникають у лісових масивах (у Чорнобильській зоні відчуження, Луганській, Житомирській і Херсонській областях) [112]. Усі ці пожежі завдають значних збитків як економіці України, так і навколишньому середовищу: атмосферному повітрю, ландшафтам та їх компонентам (ґрунтам, біорізноманіттю тощо).

Сучасні технології дистанційного зондування Землі дозволяють виконувати інфрачервоне (теплове), спектрозональне сканування і зйомку у видимому діапазоні. Їх поєднання дає змогу фіксувати пожежі та визначати їх параметри: випромінювану потужність, видимий вплив (задимлення), а також випалені землі (за обчисленим вегетаційним індексом). Важливим є автоматичний підрахунок розміру шкоди, завданої довкіллю пожежами в момент їх фіксації у наближеному до реального часу режимі. Виявлена пожежа при цьому матиме не лише фізичні характеристики (площу і потужність горіння), а й дані про масу згорілої рослинності, обсяги викидів шкідливих речовин і площу пошкоджених ландшафтів). Ці дані потрібні ДСНС України для більш точного оцінювання характеристик пожежі та швидкого підрахунку фінансових збитків за вже усталеними методиками.

Більш чіткою ціллю є визначення в натуральному вираженні розміру шкоди, яку пожежі завдають природним ландшафтам (незабудованим

територіям), за тепловими аномаліями — найбільш оперативним видом космічної зйомки, що здійснюється двічі на добу. Теплові аномалії передають лише потужність, яку було зафіксовано на певній ділянці місцевості в результаті горіння речовини. Зібравши дані за весь період спостереження пожежі, можна обчислити кількість енергії, яка виділилася від неї. Знаючи кількість енергії, що виділяється від згоряння одиниці біомаси, можна обрахувати кількість останньої та відповідно кількість шкідливих речовин, які потрапляють у навколишнє середовище. А з урахуванням кількості цієї біомаси на одиниці площі, можна точно обчислити саму площу, яка вигоріла в результаті пожежі. Для цього потрібно розробити правильну методику підрахунку потужності пожеж за фіксованим супутниками тепловим випромінюванням, визначити кількість енергії від пожежі за спостереженням її потужності, попередньо оцінити витрати горючого матеріалу за тепловим випромінюванням, кількість виділеного тепла від згоряння одиниці біомаси, кількість сухої біомаси на різних типах ландшафтів і встановити екологічні наслідки від горіння матеріалу.

Загалом лісові пожежі та методи протидії ним описано в монографії [117]. Ознайомитися з особливостями функціонування FIRMS — супутникової системи моніторингу теплових аномалій, зумовлених пожежами, можна в працях [104, 107, 118]. Чотири супутники, обладнані термосенсорами, двічі на добу здійснюють сканування території. Дані подаються у вигляді повернутої на певний кут відносно паралелей матриці з розміром комірок від 0,5×0,5 до 1×1 км, залежно від типу термосенсора. Якщо в межах комірки виявлено теплову аномалію — перевищення її температури над оточуючими комірками, центру такої комірки надаються географічні координати. Інтенсивність інфрачервоного випромінювання цієї комірки переводиться в потужність (вимірюється в МВт), яка відповідає кількості тепла, що виділяється з цієї ділянки місцевості під час пожежі.

Термосенсори, встановлені на супутниках, доволі точні і забезпечують подібні результати. Порівняння кількості енергії, яка виділяється впродовж всього часу спостереження пожежі, дає розбіжність у даних у межах 15 % [119]. Ці величини отримано з різних датчиків: одна з малого супутника Bi-spectral InfraRed Detection (BIRD), друга — з інструмента MODIS, розміщеного на супутниках Terra і Aqua. Водночас сенсори нового покоління (VIIRS) [116] показують виділення тепла у 4,8 раза більші, ніж інструмент MODIS, оскільки останній не реагує на ділянки з невисокою інтенсивністю пожежі. Хоча фактично ці дані є результатом спостережень однієї і тієї самої території. Імовірно, виходом є роздільне опрацювання даних і введення коефіцієнта потужності для даних, зафіксованих MODIS.

Якщо нанести на карту теплові аномалії по їх географічним координатам і оконтурити їх компактні зосередження, можна підрахувати площі і сумарні потужності ареалів пожежі як суми потужностей аномалій. Аналіз

наукових праць за цією тематикою свідчить, що таку методику, як правило, дуже обмежено використовують для визначення площ вигорілих територій і обсягів згорілого матеріалу, оскільки отримані значення не збігаються з візуальними обстеженнями, а також з даними з інших супутників. Більш досконалий метод визначення площ за диференційованим нормалізованим індексом згарищ (dNBR) з використанням різночасових супутникових знімків ближнього і середнього інфрачервоного діапазону (супутник Landsat 8, знімальний прилад OLI) дає більш точні результати [120]. Викид тепла, отриманий з FIRMS, означає наявність осередку на квадраті території зі стороною від 500 м до 1 км [24], а не охоплення вогнем всієї ділянки. На це вказує і потужність викиду тепла, яка може варіюватися пропорційно до площі, охопленої вогнем та його інтенсивності. Тому не можна просто оконтурювати ареал пожежі по крайніх точках і вважати це вигорілою площею.

У статті [107] наведено кілька способів обчислення енергії радіаційного випромінювання (FRE) під час пожеж. FRE є інтегралом у часі від значень FRP і може бути вирахувана через напівсуму двох вимірювань протягом доби:

$$FRE = T/2(FRPd + FRPn),$$

де FRPd і FRPn — значення вимірювань потужності радіаційного випромінювання (МВт) у денний та нічний періоди доби відповідно; T = 86 400 с. Оскільки дані знімаються кількома супутниками, а отже, потужність пожежі вийде більшою за фактичну, потрібно сумарне значення осередку пожежі поділити на кількість супутників, які надіслали дані. В такий спосіб можна обчислити кількість енергії, виділеної пожежею, за значенням миттєвої потужності, які фіксуються супутниками.

Головною проблемою є надання супутниками результатів моментальних вимірювань FRP (Fire Radiative Power — потужності випромінювання вогню), а не значення FRE, тобто кількості енергії, яку було отримано впродовж усього часу існування пожежі. Надійні значення FRE доведеться обчислювати за допомогою повторюваних спостережень FRP, а потім переводити FRE в оцінку використання палива за такою формулою:

$$\text{Маса палива (кг)} = 0{,}368 \times \text{FRE (МДж)}.$$

Швидкість горіння пального (кг/с) вираховується так:

$$\text{Швидкість горіння (кг/с)} = 0{,}368 \times \text{FRP (МВт)}.$$

Якщо підставити в ці формули значення кількості речовини, яка є в тому чи іншому ландшафті, можна отримати абсолютну площу горіння і площу пошкоджених у результаті пожежі ділянок.

Тим не менш, було зроблено кілька спроб встановити взаємозв'язки між потужністю пожежі та витратами горючого матеріалу. Найбільш корисною є праця [121], в якій встановлено залежність швидкості згоряння біомаси і потужності інфрачервоного випромінювання. Виявлено, що загальна кіль-

кість енергії, яка виділяється на одиницю маси повністю спаленого сухого палива, є відносно постійним показником для різних типів рослинності в межах від 16 000 до 22 000 кДж/кг. Однак фактичне виділення тепла під час природних лісових пожеж, як правило, дещо менше, через неповне згорання. Крім того, значна частина паливної енергії вивільняється за допомогою інших механізмів витрати тепла, передусім конвекції, а також витрачається на нагрівання підстилаючої поверхні. Ці дані важливі для узгодження значення потужності пожежі, яка обраховується з кількості згорілого матеріалу, з даними супутників. Імовірно, в останніх вже використовується правильне і точне значення витрат тепла всієї пожежею.

Для переведення обсягу фітомаси в кількість енергії, що випромінюється під час її згоряння, використовували вже виконані дослідження [122, 123], в яких встановлено, що під час згоряння 1 г фітомаси сухої речовини виділяється 4,3 Ккал, або 18 000 Дж енергії. Залишається лише з'ясувати кількість горючого матеріалу, який знаходиться на різних типах землекористування: лісах, луках, засіяних і прибраних сільськогосподарських угіддях. Кількість горючої сировини називається «запас біомаси». Для аналізу краще використовувати праці вітчизняних учених, які досліджували запаси біомаси саме для українських ландшафтів. Однак у різних працях значення кількості біомаси і запасу енергії різняться. Причиною цього є як різні підходи до її оцінки, так і різні тлумачення терміна — наземна біомаса менше загальної. Всі результати досліджень наведено в табл. 4.1—4.4, кожна з яких відповідає чотирьом найпоширенішим типам ландшафтів України. В першій колонці таблиць вказано номер праці, з якої взято дані.

Нам потрібно встановити кількість біомаси на одиницю площі, тому, використовуючи дані, наведені в дослідженні [124], потрібно виконати певні розрахунки. Загальний запас біомаси в Чернівецькій області дорівнює 44,3 млн т, а маса депонованого вуглецю становить 22,15 млн т. Розділивши ці значення на площу лісового покриву області (258,8 тис. га), отримаємо відповідно 171,17 т/га і 85,58 т/га, або 17,12 кг/м^2 і 8,56 кг/м^2 (табл. 4.1).

Результати дослідження [125] можна вважати модельними, оскільки деревний склад лісів Львівської області приблизно такий самий, як і в цілому по Україні. Середня щільність фітомаси на 1 м^2 лісових ділянок Львівщини становить від 13,9 кг/м^2 в лісорослинній області Розточчя до 19,3 кг/м^2 у Львівських Карпатах.

З результатів дослідження [124] можна визначити відсоток підземної фітомаси для деревних порід рослинності (16 %). У статті [125] вказано іншу частку пнів та коренів — 14 %. Тому середнє значення цього показника можна вважати 15 %.

Усереднені дані для лісів становлять 17,2 кг/м^2, а середня частка підземної біомаси — 15 %. Відповідно кількість надземної частки біомаси становить 14,6 кг/м^2.

Таблиця 4.1

Енергетичні характеристики лісів України

Посилання	Вихідні дані	Запас біомаси, кг/м^2	Запас вуглецю, кг/м^2	Запас енергії, Дж/м^2
[124]	Площа лісу Чернів. обл. — 258,8 тис. га Запас загальної фітомаси — 44,3 млн т Маса чистого вуглецю — 22,15 млн т Запас енергії в лісі — 7,92 ПегаДж [101] Запас стовбурної деревини — 62,9 млн м^3	17,12	8,56	$308{,}2 \cdot 10^6$
[125]	Площа лісу Львів. обл. — 629,1 тис. га Запас загальної фітомаси — 109,6 млн т Маса чистого вуглецю — 54 млн т Запас стовбурної деревини — 145,1 млн м^3	17,4	8,7 (6,9—9,6) середня 6,6	$313{,}2 \cdot 10^6$
[6]	Ліси України — $28 \cdot 10^{18}$ Дж; 9,4 млн га Енергія хвойних лісів Енергія листяних лісів	—	—	— $36 \cdot 10^6$ $19 \cdot 10^6$

Таблиця 4.2

Енергетичні характеристики луків і степів України

Посилання	Вихідні величини	Запас біомаси, кг/м^2	Запас енергії, Дж/м^2
[128]	Заплавні луки Суходільні луки Низинні луки	5,34 3,8 4,5	$96{,}1 \cdot 10^6$ $68{,}4 \cdot 10^6$ $81 \cdot 10^6$
[129]	Псамофіти (покриття 30—50 % поверхні) Пустошні (покриття 40—60 % поверхні) Різнотравно-пирійні (80 %) Пирійні (90—100 %) Заплавні луки	0,5—2,0 3,5 4,0—9,0 10—11 4—10	$9—36 \cdot 10^6$ $63 \cdot 10^6$ $72—162 \cdot 10^6$ $180—196 \cdot 10^6$ $72—180 \cdot 10^6$
[130]	Степова наземна біомаса Луки (імовірно вся біомаса), сіножаті Луки (імовірно вся біомаса), пасовища Луки (наземна біомаса), сіножаті Луки (наземна біомаса), пасовища	1,6—5,7(3,7) 1,6 1,3	$6{,}66 \cdot 10^6$ $28{,}8 \cdot 10^6$ $23{,}4 \cdot 10^6$ $19{,}4 \cdot 10^6$ $10{,}8 \cdot 10^6$
[131]	Зелена маса люцерни 10,84 т/га Суха речовина 2,54 т/га, відповідно відсоток усихання становить 77 %	0,25	$4{,}5 \cdot 10^6$

Під час аналізу біомаси луків було виявлено сумнівні дані, тому значення біомаси для лісів слід перевірити через визначення відносної густоти посадки дерев, ваги одного дерева і частки вологи в ньому. Густота дерев, описана в праці [126], становить 1 дерево на 10—16 м^2. Загалом досліджень, у яких вказано масу дерев, досить небагато; вдалося знайти лише [127], тому враховувався й певний емпіричний досвід, за яким вагу середнього дерева прийнято за 600—900 кг, в середньому — 750 кг, хоча ця цифра ймовірно є завищеною, оскільки видовий склад і якість лісів погіршилися впродовж останнього часу. Розрахунок такий: 750 кг : 16 м^2 = 46,8 кг/м^2 вологої деревини, в сухому стані вона буде легшою приблизно вдвічі. Відповідно, 23 кг біомаси з 1 м^2 — значення, близьке до 17 кг/м^2, а отже, останнє можна вважати правильним.

Займання часто охоплюють не тільки лісові території. Тому необхідно підрахувати кількість біомаси й для інших ландшафтів, зокрема для луків, пасовищ і сіножатей. У статті [128] масу сіна (сухої трави), яку можна отримати з певного роду лучних біоценозів, оцінено на рівні 5 кг з 1 м^2. У статті [129] автори описують деревне і трав'янисте покриття Чорнобильської зони відчуження і вказують наземну фітомасу основних нелісових територій на рівні від 3 до 10 кг/м^2.

Таблиця 4.3

Енергетичні характеристики сільськогосподарських угідь України

Посилання	Вихідні величини	Запас біомаси, кг/м^2	Запас енергії, Дж/м^2
[130]	Сільськогосподарські угіддя: – степова зона; – лісостепова та степова; – стерня		 $11{,}34 \cdot 10^6$ $13{,}43 \cdot 10^6$ $2{,}1 \cdot 10^6$
[134] [135]	Пшениця 40 ц/га = 400 г/м^2; Співвідношення мас зерна і соломи — 1:1,1 Вологість зерна — 20—40 % (~30 %)	0,588	$10{,}6 \cdot 10^6$

Таблиця 4.4

Енергетичні характеристики боліт і чагарників України

Посилання	Вихідні величини	Запас біомаси, кг/м^2	Запас енергії, Дж/м^2
[130]	Болота України (надземна фітомаса)	0,4	$7{,}2 \cdot 10^6$
[136]	Наземна фітомаса чагарників 700—750 ц/га	7,5	$135 \cdot 10^6$

За результатами досліджень [128—130,] запас біомаси для суходільної лучної рослинності становить від 3,8 до 5,3 кг/м^2. Ця цифра видається явно перебільшеною. Малоймовірним є твердження, що з лук такої самої площі можна отримати лише в 3—4 рази менше біомаси, ніж із лісу, адже трав'яний покрив фактично відновлюється щороку, а дерево росте 50—120 років. Навіть за вдвічі більшого щорічного приросту біомаси цифра для лук має бути як мінімум на порядок меншою. Ще один аргумент: порівняння кількість біомаси лук із загальновідомою врожайністю пшениці, яка становить близько 40 ц/га, тобто 4 тис. кг з 10 тис. м^2, або 400 г з 1 м^2. Нехай стерня і коріння становлять ще стільки ж, тоді отримуємо масу промислової культури на хороших землях із додаванням добрив 800 г/м^2, причому біомаси зі значною вологістю, але аж ніяк не 3—5 кг, навіть із урахуванням коріння. Звідки автори зазначених праць взяли «середню врожайність сухої надземної маси в межах 29,8—90,5 ц/га», тобто не меншу, ніж у спеціально виведеної культури пшениці з високою врожайністю, призначеної для запасання енергії у формі сухих поживних речовин, залишається загадкою.

У статті [127] урожайність вики сягає 80—86 ц/га, тобто 8,6 кг з 1 м^2. Це може бути за ідеальних умов. З досвіду автора, накосити зеленої трави можна близько 500 г з 1 м^2, але її вологість приблизно 75 %, що відповідає 100—150 г сіна з 1 м^2. Рекламні матеріали сільськогосподарських злакових культур, зокрема люцерни, розкривають таку особливість: «при дотриманні технології вирощування з одного гектара люцерни виходить 9—10 т сіна, а в умовах штучного зрошення — 15—20 т». Скошується люцерна п'ять разів на сезон. У цьому і криється похибка. На ідеальних ґрунтах зі зрошенням і скошуванням п'ять раз за сезон можна отримати 20 т сіна, без зрошення — 10 т, за один укіс — 2—3 т з гектара, або 200—300 г/м^2. Це більш реальна цифра для спеціальної високопродуктивної культури на хороших ґрунтах. Оскільки більшість хороших земель в Україні зайнято під зернові і технічні культури, а на луках росте суміш трав, слід орієнтувалися на цифру 150—200 г/м^2. Більш важливо для мети цього дослідження буде встановити кількість біомаси на гірських луках, на які не вносять добрива і рослинний покрив яких більш подібний до покриву незадіяних у сільському господарстві земель. У статті [132] зазначено, що вихід з 1 га сухої маси за сінокісного використання становив 2,15—4,77 т, тобто 215—477 г/м^2. Це прикладне дослідження з реально виконаним експериментом, тому й результати більш правдиві. Подібні результати отримано і в дослідженні пасовищ коня Пржевальського [133] — від 0,05 до 0,25 кг порівняно сухої ваги на 1 м^2. Усереднене значення 250 г/м^2 й використовуємо далі для проведення розрахунків.

На сільськогосподарських угіддях вирощують пшеницю, врожайність якої становить у середньому 40 ц/га, або 400 г/м^2 [134]. Співвідношення врожайності зерна пшениці до маси її соломи становить 1:1,1; кукурудзи

і ріпаку — 1:1,3; соняшника — 1:1,9; сої — 1;1,4 [135]. Тобто кукурудза має урожайність зерна 6 т/га і соломи 7,8 т/га; пшениця — 4 т/га зерна і 4,5 т/га соломи; соняшник — 3 т/га насіння і 5,7 т/га соломи; ріпак озимий — відповідно 2,8 і 3,6 т/га; соя — 2,3 і 3,2 т/га. Оскільки диференціація полів не виконується, можна прийняти середнє значення врожайності на сільгоспугіддях 400 г/м^2 насіння і 450 г/м^2 соломи, за вологості від 20 до 40 % — середнє значення 30 %. Відповідно запас біомаси становить 400 + 400×1,1 = 840 г/м^2 вологої біомаси; 840 – 840×0,3 = 588 г/м^2. Це за умови, що вологість зерна рівна вологості соломи.

Загалом досить мало оцінок кількості біомаси чагарників. У роботі [136] її оцінено в 700—750 ц/га, що загалом є реальною цифрою. Болота в Україні представлено низинними, верховими та перехідними, з яких 90 % площі займають низинні, зокрема трав'янисті болота, що мають високу біопродуктивність [130]. За даними, наведеними у статті [137], евтрофні болота характеризуються запасами надземної фітомаси у 2,9—5,25 т/га, або 0,29—0,53 кг/м^2. Це реально з огляду на достатню кількість вологи впродовж усього вегетаційного періоду рослин. Середнє значення становить 400 г/м^2, тобто 7,2·10^6 Дж/м^2 енергії.

Є також низка робіт, у яких оцінено екологічні наслідки великих пожеж. У праці [138] вказано, що через неповне згоряння біомаси в атмосферу викидається вуглекислота, обсяги якої дорівнюють 2,25 мас горючих матеріалів. Маса CO становить близько 10 %, маса сажі (C) — 0,3 %, диму — 4 % від маси матеріалів. У цій роботі розглянуто наслідки пожеж на Київщині і Житомирщині, Харківщині та Луганщині в 2020 році, за площею пожеж підраховано масу згорілих матеріалів, диму, вуглекислого газу, монооксиду вуглецю і сажі. Ці дані використано для перевірки розрахунків у нашому дослідженні.

У статті [139] наведено кількісну оцінку викидів радіації та інших шкідливих речовин під час горіння лісів у Чорнобильській зоні. Однак автори не обраховують біомасу, а напряму обчислюють обсяг шкідливих речовин. Для ще одної перевірки результатів можна використати дослідження [10], в якому забрудненість повітря (надходження шкідливих речовин) можна розрахувати за даними супутникових спостережень, але з іншого спеціалізованого супутника.

Були спроби провести подібні дослідження, але отримані результати не є досконалими і ними, на жаль, не можна скористатися. Автори роботи [114] оцінювали масу аерозольних частинок в атмосфері під час лісових пожеж, зв'язавши перехідним коефіцієнтом Ce (кг/МДж) масу M аерозолів і величину FRP (МВт). За даними багаторічних спостережень лісових пожеж дослідники [114] визначили Ce у межах від 0,018 (Східний Казахстан) до 0,127 (Філіппіни), а для лісових екосистем України значення Ce становило 0,10 кг/МДж. Пізніше ці самі автори в роботі [140] на основі лабораторних

експериментів отримали значення Ce = 0,03 кг/МДж. Така варіація коефіцієнта Ce (в рази) не є допустимою. Ще одна група статей описує моделювання пожеж, зокрема праця [141]. В цих роботах для виявлення площ пройдених пожежами користалися напівемпіричними моделями. Для виявлення швидкості поширення пожежі використовують модель палива, швидкість і напрям вітру, значення і кут ухилу місцевості. Швидкість поширення є похідною величиною і, крім того, такий набір метеорологічних параметрів ускладнює обчислення і робить їх непридатними для оперативного отримання інформації. Для Чорнобильської зони відчуження максимальна швидкість поширення полум'я становила 1,02 км/год.

В іншому варіанті аналізу даних вимірювань супутникових радіометрів MODIS автори роботи [119] отримали лінійний зв'язок між FRP (МВт) та швидкістю згоряння біомаси (кг/с) з іншим емпіричним коефіцієнтом Cbio, рівним 0,368 кг/МДж. Згодом у дослідженні [142] було показано, що це значення занижене, і автори запропонували нову оцінку 2,055 кг/МДж. І знову коефіцієнти різняться в кілька разів, що, ймовірно, зумовлено різними типами ландшафтів або навіть варіаціями одного типу ландшафту, оскільки ліси досить сильно відрізняються один від одного за запасами біоречовини.

У дослідженнях [98, 116] містяться посилання на відкриті ресурси геоданих, зокрема на космічні знімки різного походження. Є також низка статей, одна з них, наприклад, робота [143], в яких виявилося багато посилань, корисних для розроблення методики нашого дослідження. Для пошуку знімків було використано ресурс http://earthexplorer.usgs.gov/.

Дослідження ми проводили за такою методикою. Спочатку за результатами космічної зйомки слід визначити район пожежі, оконтурити її ареал і підрахувати середню потужність, кількість виділеної енергії та тривалість горіння (1). Викиди тепла, які відповідають пожежі, мають бути збережені окремо. Далі потрібно встановити типи ландшафтів, на яких розвивається пожежа, і розрахувати частки енергії, що припадають на кожний вид ландшафту. В результаті ми отримуємо кілька ареалів, кожен з яких відповідає певному типу ландшафту, має певну кількість енергії і час горіння (2). Поділивши кількість енергії кожного ареалу на кількість тепла, виробленого одиницею біомаси цього ландшафту, можна точно визначити кількість спаленого матеріалу (3). За цим показником легко встановити кількість шкідливих речовин, викинутих під час горіння (4). За вагою біомаси і її запасами для кожного типу ландшафту обчислюємо площу реально спаленої території (5).

Відомості про ландшафтні пожежі отримано за даними спостережень чотирьох супутників: Terra, Suomi NPP і NOAA-20. Завантажені дані про викиди тепла об'єднували агрегуванням точок в полігони, якщо відстань між точками становила менше 2 км (ця функція є в усіх геоінформаційних системах, у тому числі в QGIS). Значення відстані між точками в 2 км встановлено емпірично, крім того, це подвійна відстань між викидами тепла

для термосенсора MODIS, що дозволяє гарантовано включити в пожежу її трохи віддалені осередки. Контур осередку проводили по крайніх термоточках масиву, підраховували для нього сумарну потужність усіх викидів тепла, які потрапляють до нього, а також його площу. Для осередку проводили буфер радіусом 1 км.

Агрегація за часовим параметром передбачала вибір дня найбільш потужної пожежі. Якщо на її ареал накладалися ареали пожеж попереднього або наступного дня, їх відносили до цієї ж пожежі і ареали об'єднували. Для інших дат до днів появи і зникнення пожежі застосовували таку саму процедуру.

Енергія радіаційного випромінювання — це сумарна енергія, яка виділяється під час одного дня пожежі внаслідок згоряння горючого матеріалу. Її обчислюють інтегруванням потужності радіаційного випромінювання по часу спостережень. У спрощеному вигляді її можна порахувати за формулою: FRE = (FRPd + FRPn)/2×T, де FRPd і FRPn — значення вимірювань потужності радіаційного випромінювання (МВт) у денний та нічний періоди доби відповідно, T = 86 400 с для одного супутника. Відносно потужні пожежі сприймаються кількома супутниками з невеликим інтервалом між спостереженнями. Відповідно, під час агрегації термоточок буде отримано набагато більшу потужність, ніж ту, яка є насправді. Як вихід, можна усереднити значення потужності шляхом поділу сумарної енергії термоточок, які потрапили в ареал пожежі, на кількість супутників, які надіслали дані. Як правило, лише 3 з 4 супутників надсилають дані.

Типи ландшафтів, якими покрита територія пожежі, можна визначити з даних земного покриву і землекористування (Land Use Land Cover — LULC). Вони містять ареали лісових угідь, чагарників, заболоченої місцевості, забудованих територій, сільськогосподарських угідь і водних об'єктів. Особливості їх отримання і використання викладено в статтях [144, 145]. Ці дані було завантажено в растровому форматі GeoTIFF, потім переведено їх у векторний формат ShapeFile. За допомогою геопросторових операцій можна як поділити ареал пожежі на ділянки за типами ландшафтів, так і підрахувати сумарні потужності та кількості енергії цих ділянок по термоточкам, які на них потрапляють.

Щоб визначити кількість спаленого матеріалу, потрібно кількість енергії кожного ареалу пожежі поділити на кількість тепла, що виробляється одиницею біомаси. Як зазначено в працях [121—123], 1 г фітомаси сухої речовини віддає від 16 000 до 23 000 джоулів енергії, середнє значення прийнято 18 000 Дж/г сухої біомаси.

Кількість шкідливих речовин, викинутих під час горіння, становить: CO_2 — 2,25, CO — 0,1, сажі — 0,03, диму — 0,04 від маси згорілої речовини.

Для кожної ділянки пожежі, яка відповідає певному типу ландшафту, за кількістю згорілої біомаси і її запасами, визначаємо вигорілу площу. Для

ландшафтів у різний період року кількість запасів біомаси різна, зокрема для сільськогосподарських угідь восени і навесні вона складатиметься лише із запасів соломи (450 г/м^2), тоді як перед збором врожаю буде максимальною (850 г/м^2 для пшениці), що необхідно враховувати. Під час пожеж на сільськогосподарських угіддях, як правило, в період після жнив і навесні спалюють солому, тому враховуємо тільки її. Для лісу різниця буде мінімальною, в межах 1—2 %, оскільки більшість біомаси запасається в стовбурах і гілках, які ростуть повільно, і становить 14,6 кг/м^2. Для чагарників біомаса також змінюється несуттєво впродовж року і дорівнює 7,5 кг/м^2 Для пасовищ беремо максимальну біомасу (250 г/м^2), оскільки пожежі на них найчастіше виникають улітку, в сухий сезон. В інші періоди року кількість біомаси зменшуємо.

Відповідно, кількість запасеної енергії становить:

- ліси — 262,8·10^6 Дж/м^2;
- чагарники — 135·10^6;
- сільськогосподарські угіддя — 8,1·10^6 Дж/м^2 або 15,3·10^6 Дж/м^2;
- луки і пасовища — 4,5·10^6 Дж/м^2;
- болота — 7,2·10^6 Дж/м^2.

Тривалі займання є пожежами, найбільш придатними для дослідження. Для них зазвичай чітко фіксується час початку і закінчення, а значний суспільний резонанс зумовлює увагу багатьох науковців. Відповідно, для таких пожеж уже наявні деякі обрахунки, які можна порівняти з отриманими в нашому дослідженні результатами. Також для відносно недавніх пожеж були вже доступні більш досконалі методи дослідження і вимірювання, в тому числі супутникові.

Найбільший суспільний резонанс мала пожежа в Чорнобильській зоні відчуження, яка трапилася у квітні 2020 року. Того самого року були також інтенсивні пожежі в Луганській і Херсонській областях. Однак пожежу в Зоні відчуження досліджували набагато більше фахівців, оскільки вона зацікавила радіологів, біологів, фахівців з лісового господарства, дослідників заповідних територій.

За результатами цих досліджень можна встановити такі характеристики пожежі, як площу, час тривання, пошкоджену вогнем територію тощо. У статті [146] наведено щодобові площі контурів пожеж у Зоні відчуження, які дозволяють визначити пропорції пожеж та порівняти їх із сумарними даними. Ці результати наведено в табл. 4.5.

У статті [147] можна помітити різницю між площею під вогнем і пошкодженою рослинністю. Для Чорнобильської зони вона становить 265,73/414,59 = 64 %, а для зони безумовного відселення — 183,99/248,14 = 74 %. Тобто співвідношення між площею під вогнем і пошкодженою територією — близько 69 %. Детальний аналіз цієї статті наведено в табл. 4.6.

Таблиця 4.5

Поденні характеристики пожеж у Чорнобильській зоні відчуження

Дата	Локація пожеж	Біоценоз	Площа, км^2
02.04.2020	с. Недашківка	ліс	1
		луки	2
03.04.2020	н.п. Народичі	ліс	16
		луки	28
04.04.2020	Захід Чорнобильського радіоекологічного біосферного заповідника	ліс	10
		луки	27,7
05.04.2020	Район с. Рагівка	ліс	6
		луки	6
06.04.2020	На пн.-зх. від с. Рагівка та с. Червона Зірка	ліс	2
		луки	2,5
07.04.2020	На пн.-зх. від с. Рагівка та с. Червона Зірка	ліс	2
		луки	2,5
08.04.2020	Поліське, с. Копачі — Чистогалівка	ліс	24
		луки	24
09.04.2020	Поліське, сел. Копачі — Чистогалівка	ліс	34
		луки	20
10.04.2020	р. Уж, с. Копачі — Чистогалівка	ліс	22
		луки	38
11.04.2020	Поліське, с. Копачі — Чистогалівка	ліс	2
		луки	12
12.04.2020	Поліське, с. Копачі — Чистогалівка, водойма-охолоджувач ЧАЕС	ліс	9,5
		луки	11,1
13.04.2020	Поліське, сел. Копачі — Чистогалівка, водойма-охолоджувач ЧАЕС	ліс	16,5
		луки	8
14—15.04.2020	Дощ, немає даних		
16.04.2020	Поліське, Лівий берег, Овруцький район	ліс	68
		луки	76
17.04.2020	Поліський і Овручький райони, лівий берег	ліс	99
		луки	150
18.04.2020	Поліський і Овручький райони, лівий берег	ліс	35
		луки	90
19.04.2020	Поліський і Овручький райони, лівий берег	ліс	9,5
		луки	8,5
20.04.2020	Поліський і Овручький райони, лівий берег, Заплава	ліс	4,5
		луки	3,5

Таблиця 4.6

Сумарні характеристики пожеж у Чорнобильській зоні відчуження в період з 02.04.2020 по 20.04.2020

Посилання	Часовий період	Локація пожеж	Площа під вогнем, км^2	Пошкоджена площа, км^2
[146]	02.04.2020—20.04.2020	Поліський р-н. Київ. обл. Овруцький р-н Житомир обл. біля ЧАЕС лівий берег р. Прип'ять Сума	340 445 65 20 870	
[148]	08.04.2020—13.04.2020	с. Копачі — с. Чистогалівка Сума	17,5 луки 10,5 ліс 28,0	
[148]	08.04.2020—13.04.2020	с. Копачі — с. Чистогалівка Сума	33,5 луки 26,0 ліс 59,5	
[147]	04.2020	Чорнобильська зона — площа Територія зони безумовного відселення Сума Площа заповідника «Древлянський»	414,59 248,14 662,73	265,73 ліс 76 % 183,99 ліс 57 % 449,72 62,51 ліс 88 %
[149]	04.2020	Чорнобильська зона відчуження		115 ліс 35 %
[150]	04.2020	Чорнобильська зона відчуження	680	
[151]	03.04.2020—14.04.2020 16.04.2020 03.04.2020—30.04.2020	Народицький р-н. Житомир. обл. і Зона відчуження Житомир. обл. і Зона відчуження Загальна площа пожеж Чорнобильський заповідник	70,00 350,00 674,00 518,00	 324,13 лісу 107,22 перелогів 35,31 боліт 52,00 луки

З аналізу попередніх досліджень пожеж у квітні 2020 року у Зоні відчуження, можна назвати такі усереднені дані. У Чорнобильському заповіднику площа пожеж становила 518 км^2, а 662; 674; 680 км^2 — це дані з урахуванням сусідньої території. Площа безпосередньо вигорілих територій менша приблизно на 25 %. Імовірно це дані ДСНС України, а не оцінені безпосередньо за зміною вегетаційного індексу.

Попереднє ознайомлення з напрацюваннями показало потенційну можливість таких розрахунків за тепловими аномаліями, зафіксованими інфрачервоними сенсорами штучних супутників Землі. А використання даних земельного покриву і землекористування (LULC) дозволяє за покривом території, яка перебуває під вогнем (ліс, луки, сільгоспугіддя), визначити запаси біомаси, а отже, точно розрахувати площу, яка виділяла таку потужність під час горіння. Інтегрування по часу показника FRP дає змогу виявити всю площу, яка перебувала під вогнем упродовж усього часу спостережень. У дослідженні використовували скрипт, який шляхом виконання геопросторових операцій визначав контур пожежі та її інтегральну потужність за сумою потужностей викидів тепла, що потрапляють до контуру. Розроблену методику порівняно з методиками інших авторів, визначено її недоліки та переваги. Вперше проведено аналіз пожеж за результатами космічної зйомки і створено методику автоматичного визначення збитків від них. Цей алгоритм може бути використаний для роботи різних систем моніторингу в агрохолдингах і лісництвах.

4.3. Наслідки повномасштабного вторгнення РФ на територію України для забруднення атмосферного повітря за даними супутникових спостережень

Повномасштабне воєнне вторгнення РФ на територію України, яке розпочалося 24 лютого 2022 року, зумовило безпрецедентний ступінь забруднення атмосферного повітря. Загалом усі зміни у джерелах викидів та вмісту забруднюючих речовин можна умовно розподілити на чотири групи:

1) поява нових «військово зумовлених» джерел викидів, які спричиняють зміни якості атмосферного повітря, достатні для їх виявлення на основі супутникового зондування хімічних складових: а) численні пожежі у природних екосистемах унаслідок артилерійських обстрілів, особливо на лінії фронту; б) активність військової техніки; в) наслідки ракетних ударів по об'єктам промисловості з подальшим горінням;

2) зменшення викидів від промислових підприємств через їх тимчасову зупинку або руйнування;

3) зменшення викидів від автотранспорту в одних містах та перерозподіл викидів у часі в інших;

4) перерозподіл у просторі й часі та зміна характеристик деяких джерел викидів, наприклад спалювання сухостою на полях, пожежі у природних екосистемах, спричинених активністю населення, тощо.

Зміни забруднення атмосферного повітря у 2022 році були різними для різних етапів війни. Так, найбільші зміни порівняно з попередніми роками були характерні для лютого, березня та квітня. Ці зміни ми детально розглянемо окремо. Починаючи з травня 2022 року значна частина неоку-

пованих міст, особливо на віддалі від лінії фронту, поступово почала повертатися до звичної активності, що зумовило подібність антропогенних викидів та формування поля забруднення до попередніх років. Наслідки війни для атмосферного повітря після травня 2022 року набули локалізованого характеру на віддалі від лінії фронту та окремих регіональних особливостей поблизу лінії фронту та на окупованих територіях. Цей період потрібно розглядати окремо для різних територій з урахуванням впливу війни на них. Далі ми зупинимося на прикладах найбільш типових змін.

Серед усіх газових складових атмосферного повітря, дані про які дозволяє отримати Sentinel-5P, лише вміст NO_2 дає можливість оцінити загальні зміни якості атмосферного повітря (що зумовлено надходженням NO_2 від різноманітних джерел викидів, вищою точністю визначення вмісту та відносно коротким часом існування в атмосфері). Наслідки викидів інших газових складових можна виявити лише для окремих небезпечних подій.

У період з 20 лютого (у зв'язку зі значною військовою активністю поблизу кордонів України напередодні вторгнення) до 30 квітня загальний вміст NO_2 у тропосфері зазнав найбільш значущих змін у великих містах, на сході, північному-сході території України і на суміжних з Україною територіях (рис. 4.11). Хоча загалом досить складно простежувати і аналізувати зміни абсолютних значень вмісту забруднюючих речовин в атмосферному повітрі за настільки короткий проміжок часу (менше 3 місяців) через значну мінливість висоти ГША (рис. 4.12).

Тому для виявлення змін вмісту забруднюючих речовин, спричинених війною, необхідно врахувати вплив метеорологічних умов на процеси розсіювання чи накопичення домішок в атмосфері. Лише після цього можна оцінити реальні зміни забруднення атмосфери. З цією метою було знайдено різницю між вмістом NO_2 за лютий–квітень 2022 року та середнім значенням за ці ж місяці у попередні роки. Подібну різницю обраховано і для висоти ГША (рис. 4.12). Це дає можливість зрозуміти як поліпшувалися чи погіршувалися умови розсіювання домішок. На територіях, де висота ГША у 2022 році зростала порівняно з попередніми роками, очікуваним є зменшення вмісту забруднюючих речовин, оскільки вищий ГША сприяє кращому розсіюванню домішок. І навпаки, де ГША був нижчим, там очікуваним є зростання концентрацій забруднюючих речовин. Звичайно, не можна стверджувати, що метеорологічні умови відповідальні за всі зміни (може спостерігатися і збільшення вмісту забруднюючих речовин на територіях з нижчим ГША через зростання викидів), але це дає змогу виявити регіони, для яких зміни вмісту забруднюючих речовин мало пов'язані з метеорологічними умовами та пояснюються переважно викидами. Так з рис. 4.13 чітко видно території, де у 2022 році очікуваним є зменшення концентрацій (захід і південний захід розглянутої області), та, навпаки, їх зростання (північний схід розглянутої області). Водночас території, де зворотна за-

лежність між висотою ГША та вмістом NO_2, не спостерігається, і є місцями найбільших змін у забрудненні, пов'язаних з воєнними діями.

Перше, на що потрібно звернути увагу на рис. 4.13, — це зростання вмісту NO_2 на півдні (у тому числі й на Кримському півострові), на північному сході території України, де роками проходила лінія розмежування, а також на межі Київської і Житомирської областей. Усі ці регіони за звичайних умов не повинні були б характеризуватися зростанням NO_2 через відсутність метеорологічних передумов для цього. Так, незважаючи на зростання висоти ГША в межах від 0 до 80 м, збільшення вмісту NO_2 сягнуло $1{,}0 \cdot 10^{-5}$ моль/м^2. Причиною цих змін і є бойові дії в цих регіонах, де спостерігалося значне надходження забруднюючих речовин від пожеж у природних екосистемах після обстрілів та через підвищену активність військової техніки. Подібні залежності спостерігаємо на території Білорусі та РФ поблизу кордону з Україною. Крім того, звертає на себе увагу неочікувано значне зменшення NO_2 у м. Київ — до $-2{,}0 \cdot 10^{-5}$ моль/м^2, що відображає наслідки зменшення кількості автотранспорту. Подібні залежності є і в інших містах, проте зміни NO_2 там менш інтенсивні через зазвичай меншу кількість викидів.

Отже, зміни загального вмісту NO_2 в атмосфері формувалися порізному, залежно від місяця та етапу війни. На рис. 4.14—4.16 показано характерні зміни вмісту NO_2 та висоти ГША для кожного місяця окремо.

У лютому 2022 року змінення забруднення атмосферного повітря порівняно з попередніми роками мало досить неоднорідний характер (рис. 4.14). На заході території України основні зміни відбулися ще до початку повномасштабної воєнної агресії РФ. І хоча загалом ГША на всій території України характеризувався нижчими висотами, в гірських районах Карпат спостерігалося зменшення фонового вмісту NO_2 до $-1{,}7 \cdot 10^{-5}$ моль/м^2, тоді як на Закарпатті, Волині, у Тернопільській і Хмельницькій областях вміст NO_2 значно зріс у зв'язку з більш активним перенесенням забрудненого атмосферного повітря із заходу. На Закарпатті та Волині основну роль відіграли викиди в інших країнах на заході, а в Тернопільській та Хмельницькій областях до цього додалося ще й перенесення забруднення від Бурштинської ТЕС. Водночас на сході території України, а також у суміжних з Україною областях РФ спостерігалося значне зростання NO_2 — на $2{,}5 \cdot 10^{-5}$ моль/м^2 більше, ніж у попередні роки. Частково цей вплив спричинено менш сприятливими для розсіювання умовами, адже ГША в цих районах був на 150 м нижчим. Проте формування такого високого вмісту NO_2 у другій половині лютого 2022 року з високою ймовірністю є наслідком активності військової техніки та її постійного переміщення поблизу кордонів з Україною.

Поряд з описаними вище змінами на рис. 4.14 чітко видно неузгодженість зменшення висот ГША та зниження вмісту NO_2 у центральній смузі території України між 30° та 36° сх. д., де немає очікуваного зростання кон-

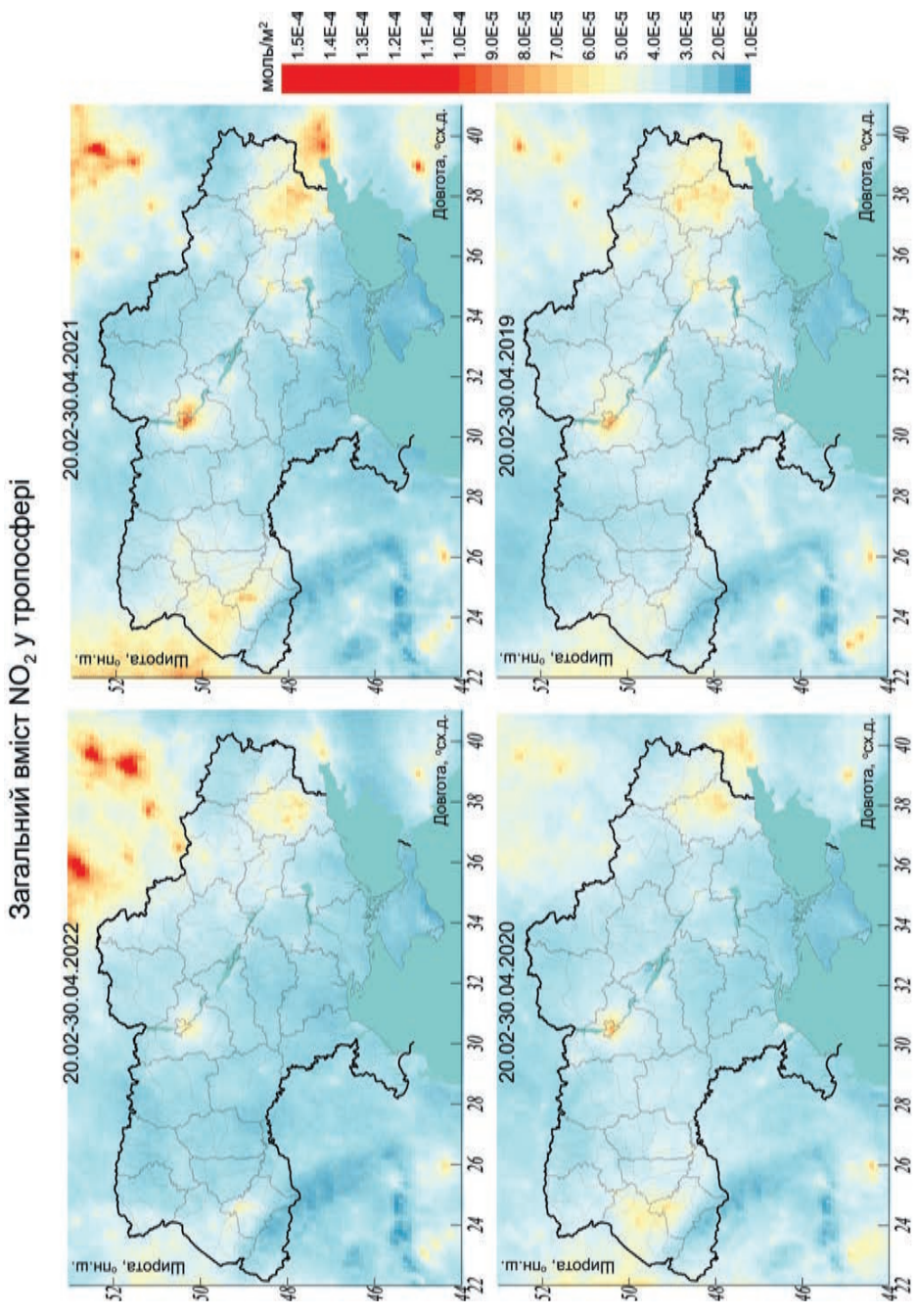


Рис. 4.11. Загальний вміст NO_2 у тропосфері протягом лютого–квітня з 2019 по 2022 рік

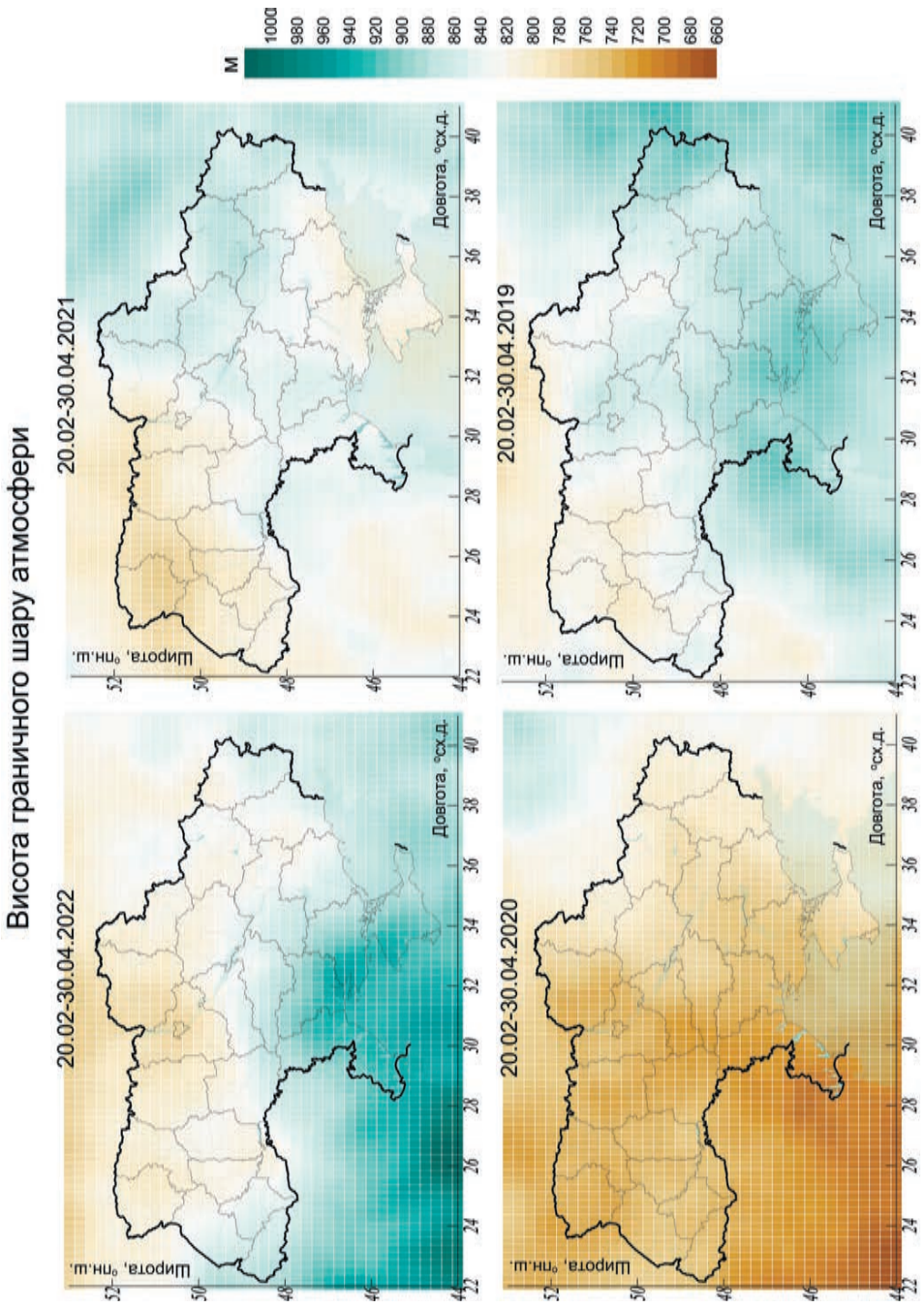


Рис. 4.12. Середня висота ГША протягом лютого–квітня з 2019 по 2022 рік

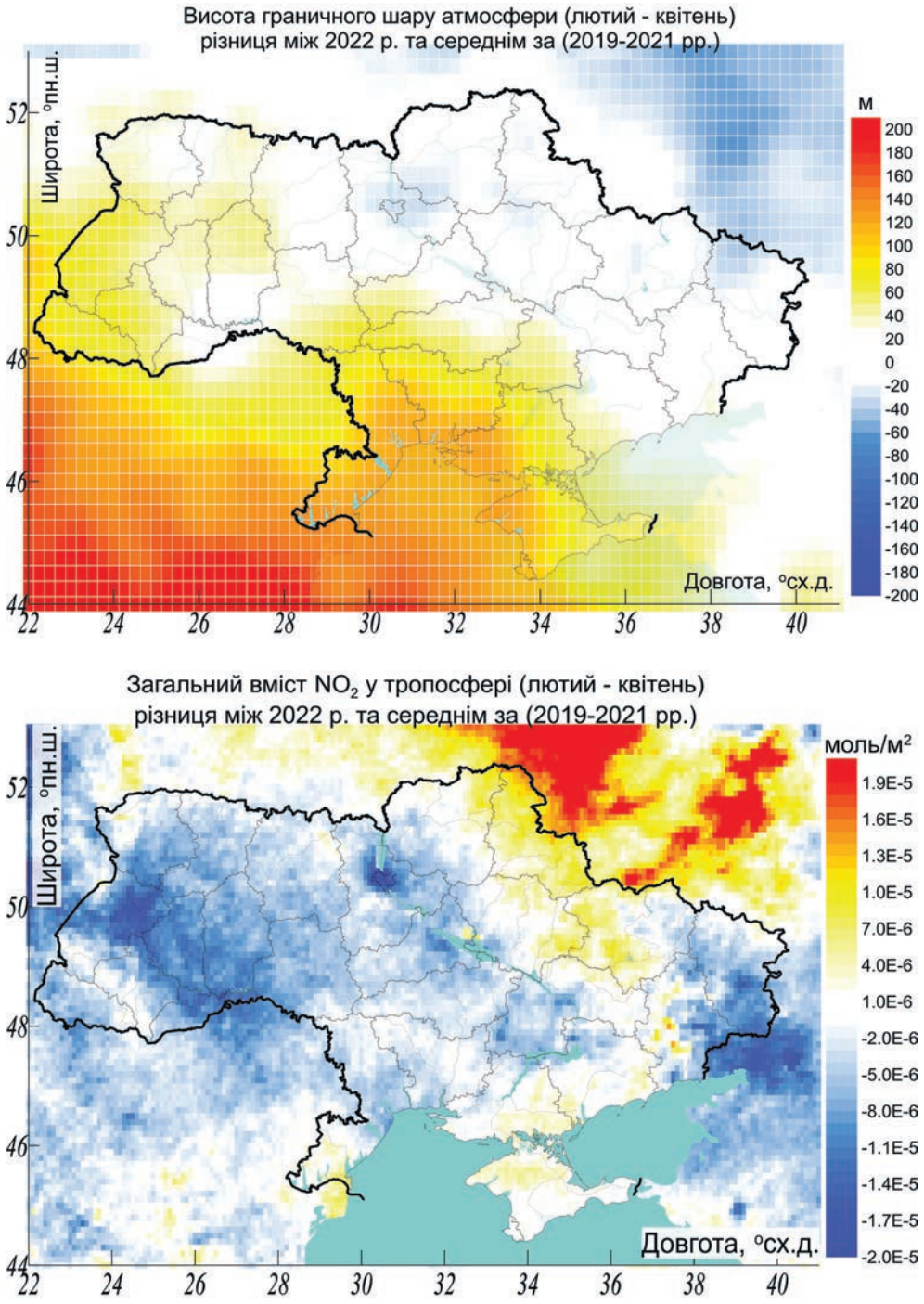


Рис. 4.13. Відмінність висоти ГША та загального вмісту NO_2 у тропосфері протягом лютого–квітня 2022 року порівняно з середнім значенням за 2019—2021 роки

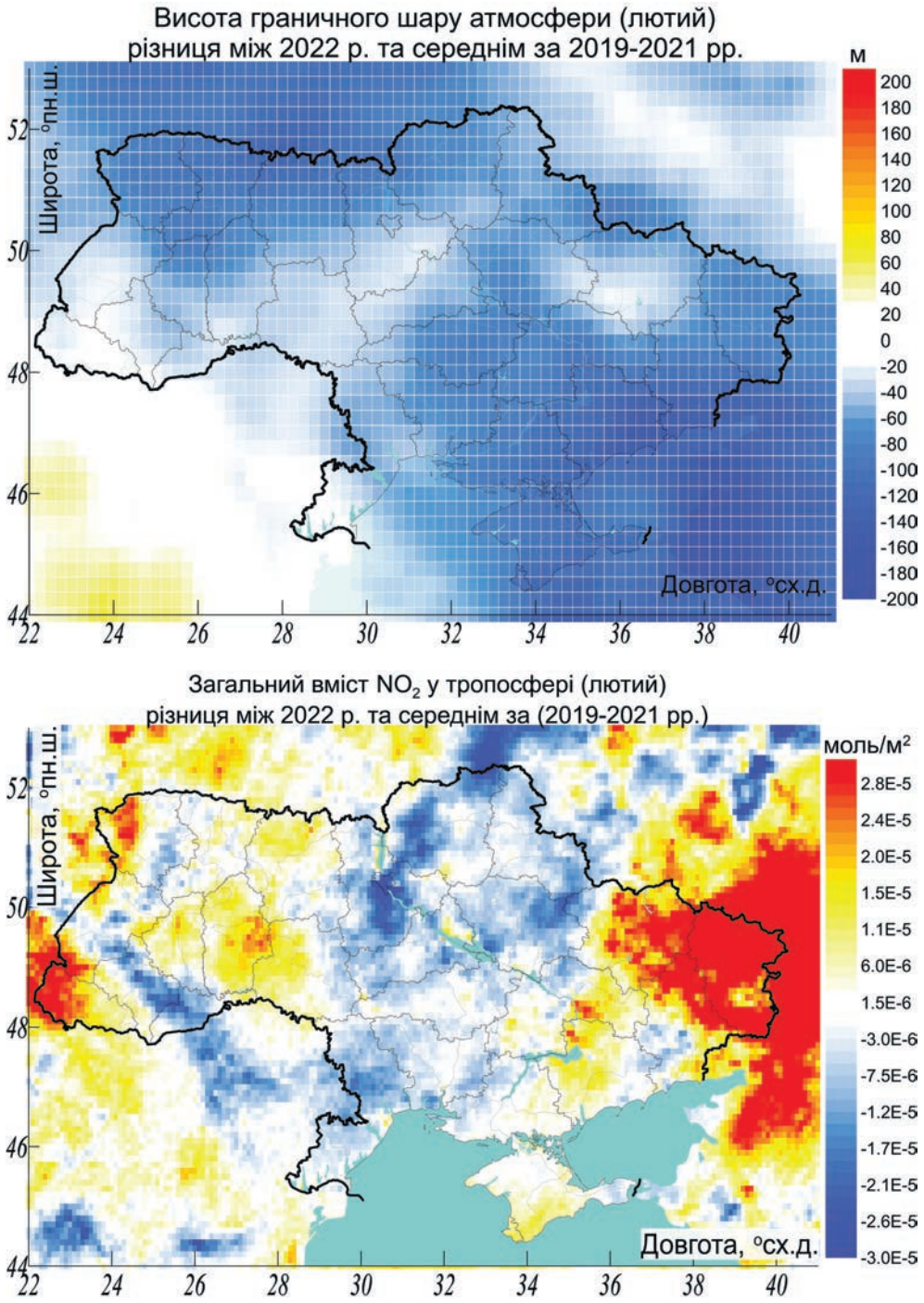


Рис. 4.14. Відмінність висоти ГША та загального вмісту NO_2 у тропосфері протягом лютого 2022 року порівняно з середнім значенням за 2019—2021 роки

центрацій. Зменшення вмісту NO_2 відбувалося переважно вже після 24 лютого 2022 року та є наслідком істотного зменшення обсягів виробництва та руху автотранспорту у великих містах в перші тижні повномасштабної війни. Разом з тим, зміни вмісту NO_2 у Київській, Чернігівській, Сумській, Херсонській, Донецькій областях часто мають дуже локалізований характер, з численними незначними за площею осередками зростання чи зменшення NO_2, кожен з яких має свою історію формування, час появи, тривалість, та причини (переважаючий вплив й активність тих чи інших джерел викидів).

Березень 2022 року характеризувався вищими ГША над усією розглянутою територію (рис. 4.15), досягаючи різниці у 180 м порівняно з 2019—2021 роками. Це зумовило кращі умови для розсіювання домішок і загальний рівень забруднення зменшився, що накладалося на загальне зменшення викидів від промисловості та автотранспорту, спричинене війною. Однорідність зростання висоти ГША над територією України дозволила чітко встановити нетипово високу активність джерел викидів з подальшим зростанням загального вмісту NO_2 у тропосфері порівняно з попередніми роками. Так, на території України простежуються зони, де накладалися впливи як викидів від військової техніки під час найактивніших бойових дій, так і наслідки пожеж у природних екосистемах. Подібні осередки трапляються на території Київської, Чернігівської, Сумської, Харківської, Донецької, Запорізької, Херсонської та Миколаївської областей. Проте навіть на цих територіях викиди були менш інтенсивними, ніж на суміжній з Україною території РФ.

Враховуючи три вагомі факти, а саме: 1) метеорологічні умови сприяли кращому розсіюванню забруднюючих речовин; 2) кількість пожеж в екосистемах (що часто є причиною високого вмісту як NO_2, так і CO та CH_2O) не була вищою, ніж на території України; 3) осередки викидів на території РФ фіксувалися здебільшого поза населеними пунктами, приходимо до висновку — найбільш імовірною причиною підвищеного вмісту NO_2 в атмосфері поблизу кордонів з Україною було постійне переміщення і спалювання палива військовою технікою (наскільки добре дані Sentinel-5P дозволяють виявляти наслідки викидів навіть від автотранспорту, показано у підрозділі 3.2). І хоча інформація про переміщення і кількість військової техніки навряд чи коли-небудь буде доступною, а аналіз супутникових даних вмісту хімічних складових без інформації про джерела викидів є вкрай складним завданням, просторовий розподіл та щоденна динаміка осередків NO_2 у березні 2022 року дає достатньо доказів подібного впливу. Більш того, на рис. 4.15 позначено чотири основні пропускні пункти на кордоні України з РФ — Грем'яч, Бачівськ, Юнаківка, Гоптівка. До них ведуть основні шляхи сполучення, які найчастіше використовували після підриву залізниці в перші дні війни. Осереднення щоденних даних загального вмісту NO_2 у

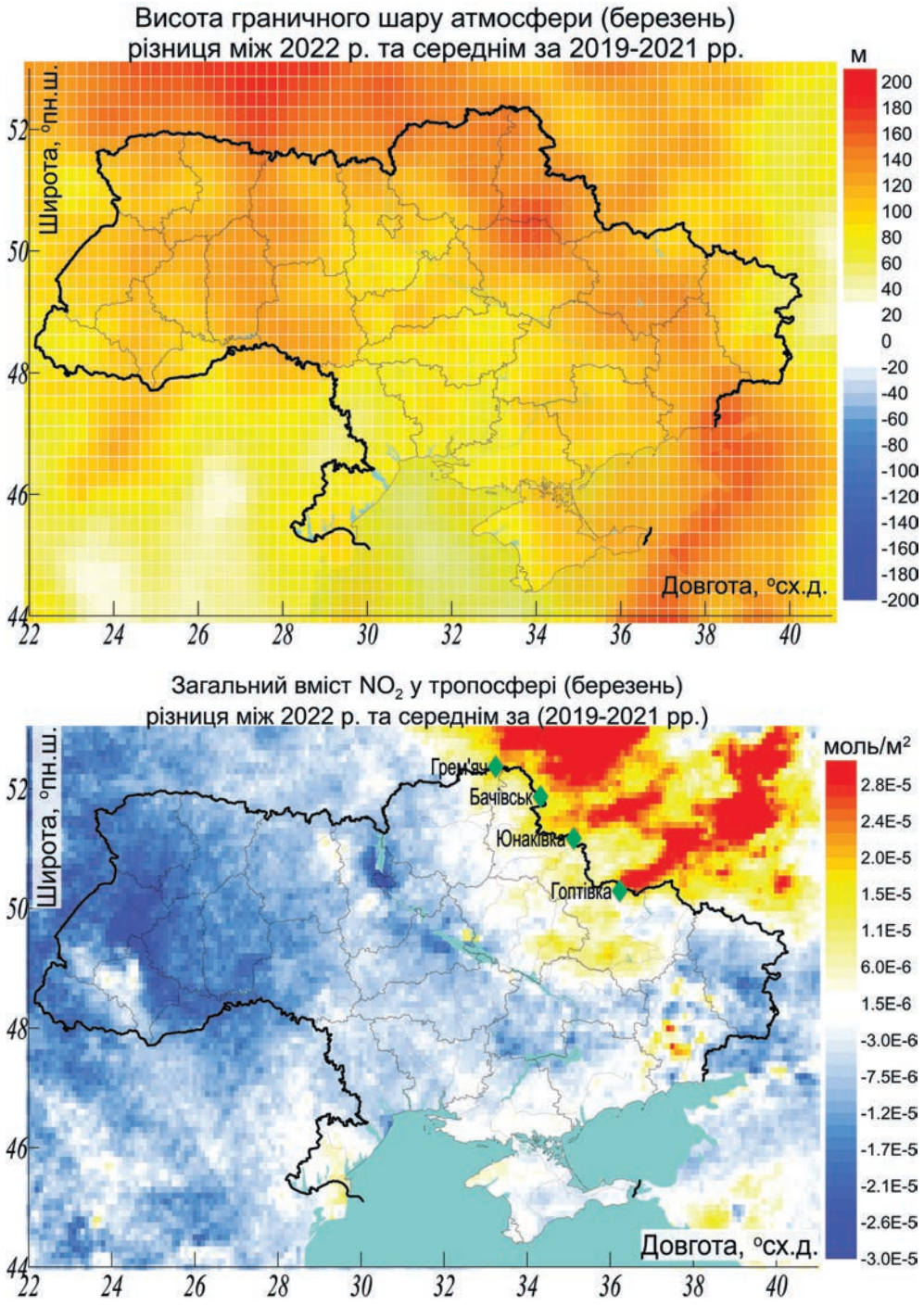


Рис. 4.15. Відмінність висоти ГША та загального вмісту NO_2 у тропосфері протягом березня 2022 року порівняно з середнім значенням за 2019—2021 роки

тропосфері за березень привело до окреслення траєкторій із забрудненим атмосферним повітрям, що спрямовані до цих пропускних пунктів.

Починаючи з квітня 2022 року зміни забруднення атмосферного повітря, спричинені повномасштабним вторгненням РФ починають набувати більш стабільного характеру. Поступово, з поверненням міст до більш звичного життя, хоча й в умовах воєнного стану, зникають характерні міські мінімуми концентрацій забруднюючих речовин. Квітень 2022 року є останнім місяцем з яскраво вираженим мінімумом NO_2 у м. Київ (рис. 4.16). Поступово зменшувалися й максимуми NO_2 на кордоні з Україною.

Загалом протягом теплого періоду року основними потужними джерелами викидів в атмосферу під час війни стали пожежі в природних екосистемах та звичайні для мирного часу наслідки антропогенних викидів у містах. Час від часу з'являються короткострокові осередки високого вмісту забруднюючих речовин від ракетних ударів по об'єктам промисловості.

На рис. 4.17 наведено приклад наслідків викидів CO від пожеж у природних екосистемах під час бойових дій поблизу р. Сіверський Донець 8 травня та 9 червня 2022 року. Зазвичай подібні пожежі виникають після інтенсивних артилерійських обстрілів території і призводять до посилення викидів NO_2, CO та інших забруднюючих речовин. Вміст NO_2 може перевищувати $2{,}0 \cdot 10^{-4}$ моль/м^2, тобто щонайменше в 5 разів перевищувати фонові значення, тоді як вміст CO може сягати 0,07 моль/м^2, тобто більш ніж утричі перевищувати фонові значення. Подібні пожежі поблизу лінії фронту спостерігаються впродовж усієї війни.

Наслідки війни для кожного окремого міста в Україні є унікальними і залежать від багатьох факторів, серед яких близькість розташування до зони бойових дій, перебування під окупацією, тривалість, стратегічна роль міста та його інфраструктури, наявність великих підприємств, економічна залежність міста від «вразливих» секторів виробництва, гуманітарна роль та ін. Фактично з лютого 2022 року (а для деяких регіонів з 2014 року) постала необхідність визначення наслідків воєнних дій для стану атмосферного повітря, а також проблема, пов'язана з неможливістю прогнозування подальших бойових дій та післявоєнного розвитку. При цьому закономірності для різних забруднюючих речовин можуть кардинально різнитися. На рис. 4.18—4.22 на прикладі загального вмісту NO_2 у тропосфері показано порівняльний аналіз наслідків перших семи місяців війни на розподіл забруднення у різних містах України.

Загалом для порівняльного аналізу на цьому етапі війни можна застосувати територіальний підхід до класифікації населених пунктів. Варто розділяти великі міста з потужними антропогенними джерелами викидів та невеликі міста й села, зміни забруднення в яких були локальними, пов'язаними переважно з бойовими діями. Ми акцентуємо увагу саме на великих містах зі значною кількістю антропогенних джерел викидів.

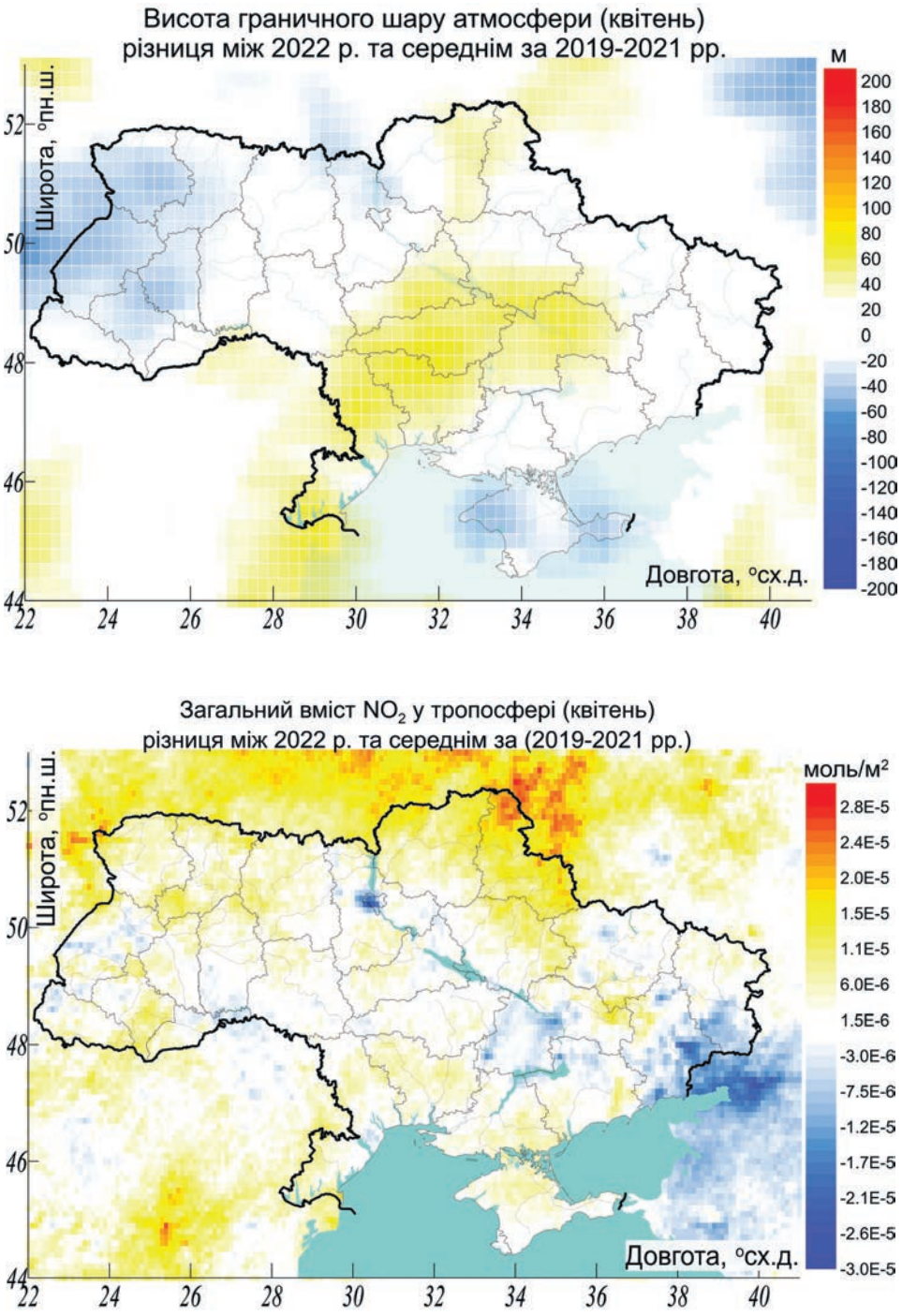


Рис. 4.16. Відмінність висоти ГША та загального вмісту NO_2 у тропосфері протягом квітня 2022 року порівняно з середнім значенням за 2019—2021 роки

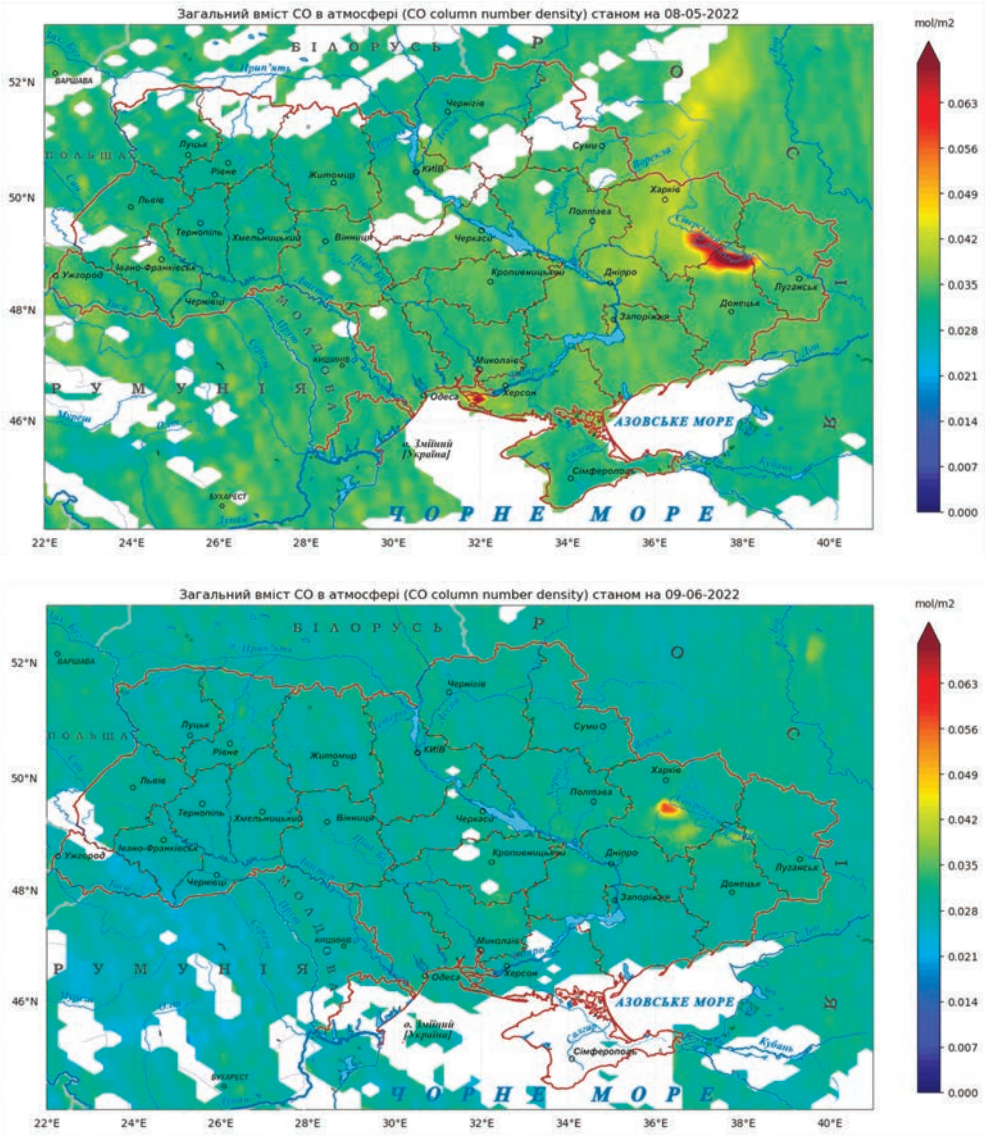


Рис. 4.17. Просторовий розподіл загального вмісту CO в атмосфері під час пожеж у природних екосистемах, які виникли внаслідок воєнних дій вздовж р. Сіверський Донець 8 травня та 9 червня 2022 року (карти згенеровано автоматизованою системою оцінки якості атмосферного повітря УкрГМІ)

Перша група таких міст — це міста, розташовані на значній відстані від лінії фронту, які проте зазнавали ракетних ударів та наслідків постійної або тимчасової зміни економічної активності (рис. 4.18). Це переважно міста західної та центральної частини території України. Ще одним фактором

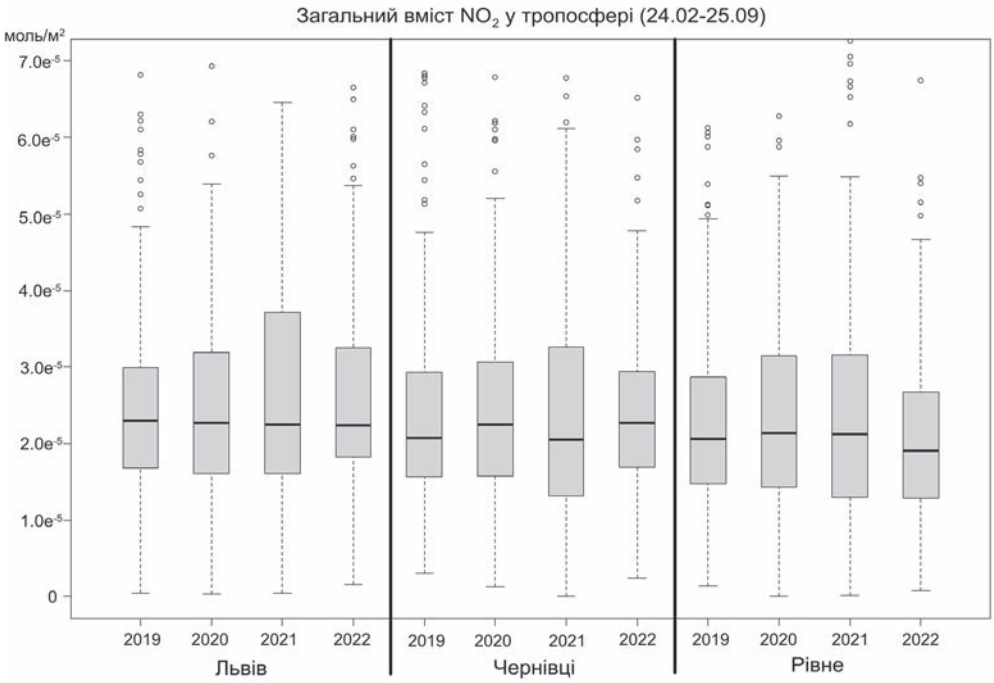


Рис. 4.18. Діаграма розмаху загального вмісту NO_2 у тропосфері за період з 24 лютого до 25 вересня кожного року на прикладі міст України, які під час війни зазнавали впливу тільки ракетних обстрілів

впливу на забруднення таких міст могло бути зростання активності автотранспорту у зв'язку з припливом до них великої кількості внутрішньо переміщених осіб.

Друга група — це міста, які певний час перебували поблизу лінії фронту, але так і не були окуповані (рис. 4.19). Поряд із ракетними ударами ці міста зазнавали більш значних руйнувань і мали більші наслідки від зупинки або руйнування підприємств. Із таких міст виїхала значна кількість населення, але в подальшому більшість з них повернулися.

Третя група населених пунктів — це міста, які практично весь час перебували у прифронтовій зоні (рис. 4.20). Від другої групи їх відрізняє тривалість ведення бойових дій поряд із містом.

Четверта група — це міста, окуповані у 2022 році (рис. 4.21). Звичайно, процес окупації міг бути абсолютно різним: від досить швидкого входження військ РФ (наприклад, Мелітополь) до тривалої облоги та нищівних бомбардувань (Маріуполь).

П'ята група — це міста, які перебувають під окупацією з 2014 року (рис. 4.22). Загалом для окупованих міст, супутникові дані є єдиним джерелом інформації про стан якості атмосферного повітря.

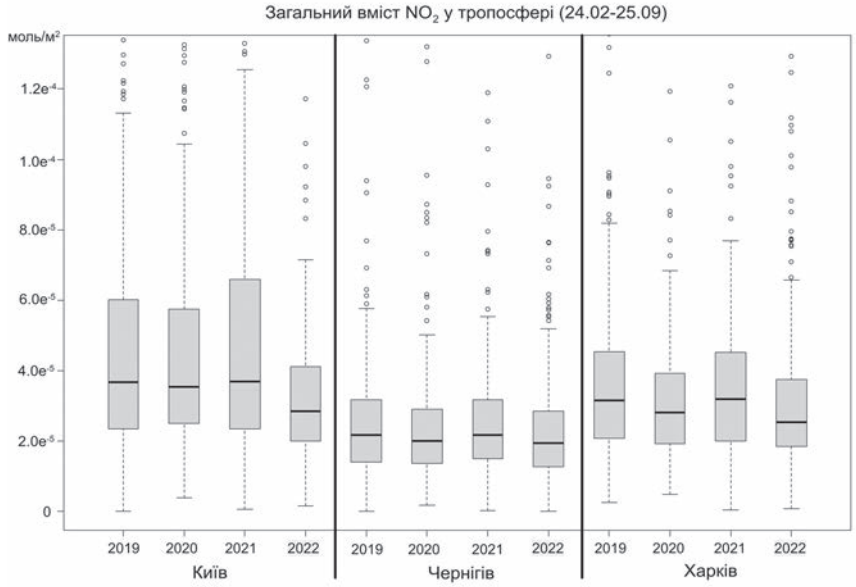


Рис. 4.19. Діаграма розмаху загального вмісту NO_2 у тропосфері за період з 24 лютого до 25 вересня кожного року на прикладі міст України, які певний час перебували у прифронтовій зоні

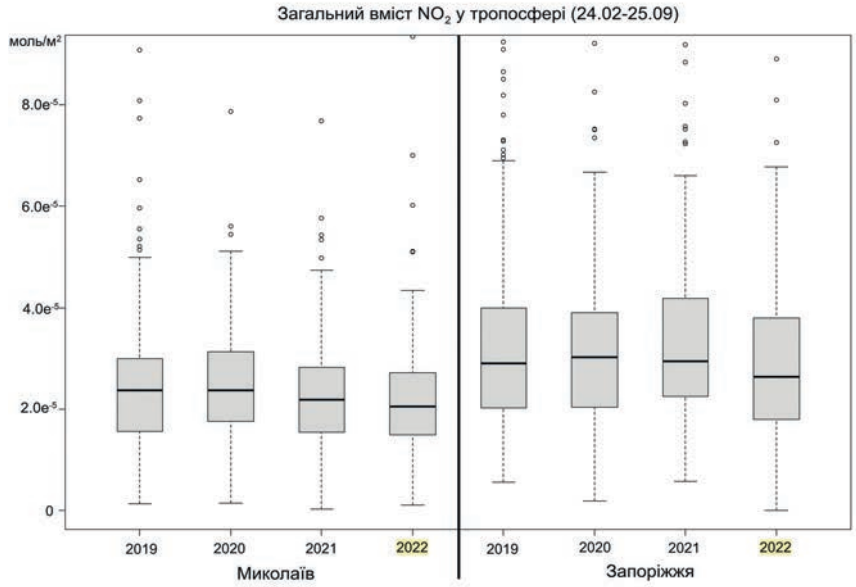


Рис. 4.20. Діаграма розмаху загального вмісту NO_2 у тропосфері за період з 24 лютого до 25 вересня кожного року на прикладі міст України, які тривалий час перебували у прифронтовій зоні

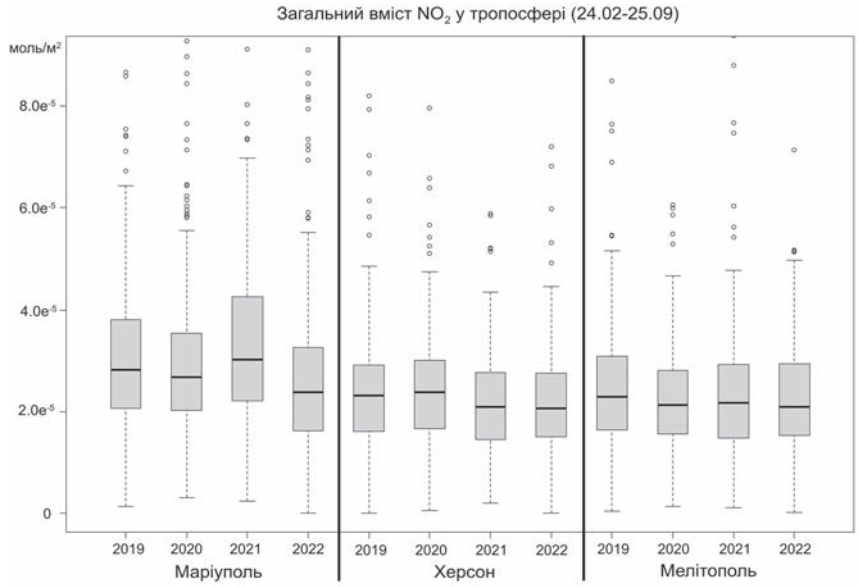


Рис. 4.21. Діаграма розмаху загального вмісту NO_2 у тропосфері за період з 24 лютого до 25 вересня кожного року на прикладі міст України, які були окуповані у 2022 році

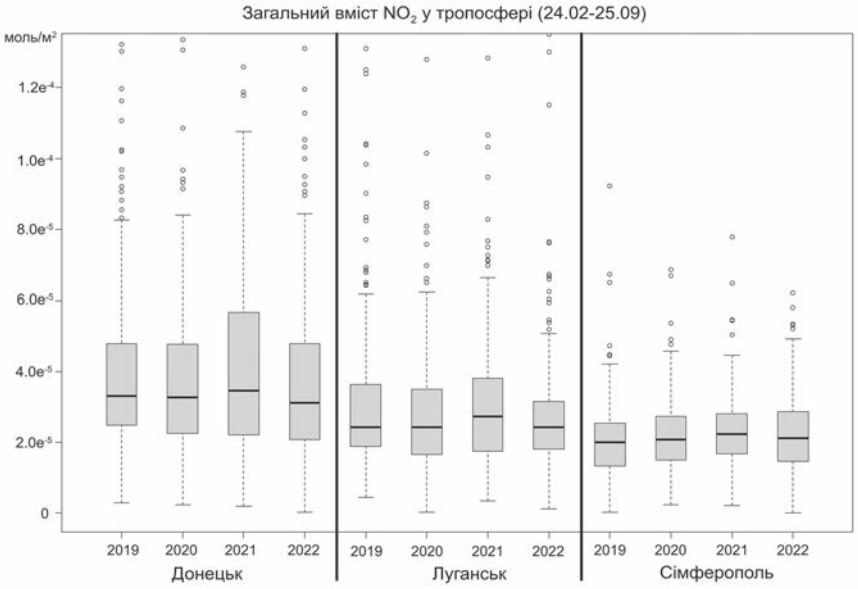


Рис. 4.22. Діаграма розмаху загального вмісту NO_2 у тропосфері за період з 24 лютого до 25 вересня кожного року на прикладі міст України, які були окуповані з 2014 року

Для першої групи міст, найвіддаленіших від лінії фронту, за перші 7 місяців війни характерно дуже незначне зменшення розкиду значень загального вмісту NO_2 у тропосфері (рис. 4.18). Це єдина суттєва зміна, що відображається на тривалому проміжку часу. Звичайно, спостерігаються короткострокові зростання забруднення після ракетних ударів по промисловим об'єктам, проте подібні «аномалії» вмісту забруднюючих речовин не відіграють помітної ролі в середніх показниках та мало позначаються на загальному полі забруднення.

Міста, поблизу яких деякий час відбувалися активні бойові дії, характеризуються дуже широким діапазоном змін, проте у всіх них ці зміни були відчутними (рис. 4.19). Для таких міст характерно зменшення середніх та медіанних значень порівняно з попередніми роками та переважно зменшення розкиду. Наприклад, у Чернігові ці зміни є незначними, проте у Києві наслідки виявилися одними з найбільш відчутних в Україні. Так, 75 % процентилів у 2022 році став близьким до медіанних значень попередніх років. Причому основну роль у зменшенні загального вмісту NO_2 відіграли не воєнні дії та ракетні удари, а колосальне зменшення викидів від автотранспорту.

Такі міста, як Миколаїв та Запоріжжя, практично весь досліджуваний період перебувають неподалік від лінії фронту. Незважаючи на тривалість перебування цих міст у прифронтовій зоні, зміни загального вмісту NO_2 в них подібні до змін у Чернігові та Харкові. Цікаво, що у Запоріжжі поряд зі зниженням середніх та медіанних значень розкид дещо збільшився порівняно з попередніми роками (рис. 4.20). Це може бути наслідком зростання короткострокових випадків високого забруднення після ракетних обстрілів по промисловій інфраструктурі міста. Проте для підтвердження такого припущення недостатньо мати лише супутникові дані. Загалом поле забруднення в містах третьої групи змінюється внаслідок дії двох основних факторів: 1) зменшення викидів від автотранспорту через виїзд частини населення до більш безпечних районів; 2) руйнування об'єктів інфраструктури, що на тривалому проміжку часу проявляється у вигляді зменшення середніх концентрацій забруднюючих речовин.

У містах, які потрапили під окупацію у 2022 році, зменшення вмісту забруднюючих речовин більшою мірою спостерігається там, де точилися інтенсивні бої і були суттєві руйнування (рис. 4.21). Водночас забруднення у містах, які були окуповані без значних воєнних дій, залишилося на рівні попередніх років. Оцінити наслідки для Маріуполя, який зазнав жахливих руйнувань, а великі промислові підприємства міста були повністю знищені, можна буде лише з часом. Втім, за загальним вмістом NO_2 у Маріуполі спостерігається характерне зменшення рівня забруднення, але не таке значне як можна було очікувати. Однак слід пам'ятати, що в Маріуполі не NO_2, а CO багато в чому визначав незадовільну якість атмосферного повітря. Вра-

ховуючи час перебування CO у атмосфері, піврічного періоду війни недостатньо для того, щоб виявити реальні наслідки знищення інфраструктури міста. Це можна буде проаналізувати лише в 2023 році, коли сформується достатня вибірка супутникових даних. Хоча вміст NO_2 і зменшився, надходження від інших джерел викидів частково нівелює ці наслідки.

Вплив на забруднення атмосферного повітря повномасштабного воєнного вторгнення РФ помітний і на окупованих з 2014 року територіях (рис. 4.22). Якщо у містах АР Крим змін у полі забруднюючих речовин не виявлено, то в окупованих містах Донецької та Луганської областей спостерігається зниження забруднення атмосферного повітря, подібне до неокупованих міст поблизу лінії фронту. Зменшення середніх та медіанних значень є незначним, проте розмах загального вмісту NO_2 став меншим.

Головною особливістю впливу війни на стан забруднення атмосферного повітря є його непередбачуваність та неможливість прогнозування наслідків. З жовтня 2022 року розпочався новий етап терористичної агресії РФ, пов'язаний з численними масованими ракетними атаками та ударами баражуючими боєприпасами (дронами-камікадзе) по об'єктам критичної інфраструктури, переважно теплоелектростанціям. Як було зазначено вище, формування забруднення атмосферного повітря в Україні значною мірою залежить від активності роботи ТЕЦ / ТЕС. Руйнування таких об'єктів призводить, з одного боку, до припинення виробництва енергії на постраждалих станціях, а з іншого — до додаткового навантаження на решту з них. Чим завершиться цей етап агресії невідомо. Крім того, зараз складно спрогнозувати, якою буде подальша експлуатація ТЕЦ / ТЕС в Україні. Звичайно, після завершення війни розпочнеться відновлення інфраструктури, і напевне відбуватиметься воно із застосуванням новітніх технологій, що в майбутньому сприятиме зменшенню викидів від енергетичних об'єктів. Проте поки що, під час війни, всі воєнні атаки на об'єкти критичної інфраструктури та перерозподіл навантаження лише погіршують, хоча й локально, якість атмосферного повітря.

ВИСНОВКИ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Ця монографія підбиває певні підсумки досліджень викидів тепла, ландшафтних пожеж і моніторингу забруднення повітря. На її сторінках автори приділили увагу як технічному аспекту реалізації комп'ютерних систем моніторингу, так і географічному аналізу об'єктів дослідження, який ґрунтується на щоденних спостереженнях упродовж кількох років. Автоматична обробка даних спостережень з їх картографічним представленням є показовим прикладом не лише якісного аналізу, а й яскравого географічного дослідження двох цих показників.

Супутниковий моніторинг забруднення атмосферного повітря наразі є єдиним джерелом спостережень, що повністю покриває територію України і дозволяє аналізувати якість атмосферного повітря там, де відсутні наземні станції моніторингу. Незважаючи на певні недоліки, які поступово усуватимуться в майбутньому з розвитком відповідних технологій, вже зараз «супутниковий погляд» на забруднення атмосферного повітря змінює наше уявлення про роль тих чи інших джерел викидів та переважаючих фізико-хімічних процесів в атмосфері. Особливо значущу роль відіграли супутникові методи моніторингу після повномасштабного воєнного вторгнення РФ на територію України у 2022 році, що підтвердило спроможність цих методів долати різноманітні виклики не лише в разі виникнення природних надзвичайних ситуацій, а й під час активних воєнних дій. Як виявилося, вчасно створені автоматичні системи обробки супутникових даних дозволили скоротити час проведення оперативного аналізу і надавати інформацію про осередки високого вмісту забруднюючих речовин з метою прийняття оперативних рішень, що в умовах війни є критично важливим.

Перспективи розширення сфери використання даних супутникового моніторингу забруднення атмосферного повітря настільки різноманітні, що важко навіть перелічити всі можливі варіанти застосування цього методу. Наразі активно продовжується вдосконалення розроблених автоматичних

систем, надалі їх кількість однозначно буде зростати, відкриваючи все нові й нові можливості практичного застосування. Представлена в цій роботі автоматизована система також постійно поліпшується, підвищується точність фільтрування даних, адаптуючись до оновлень у центрах приймання супутникових даних. Найближчим часом на меті є покриття всіх обласних центрів України та всіх найбільших підприємств — забруднювачів атмосферного повітря. Розширюватиметься і наукова компонента використання супутникових даних. Перспективним є напрям, пов'язаний із поєднанням супутникових даних з чисельними методами моделювання атмосферних процесів та перенесення забруднюючих речовин. Це дозволить перейти від моніторингу в режимі, близькому до реального часу, до прогнозування на найближчі години та добу. Відкриються можливості й для вирішення зворотних задач методами інверсійного моделювання, тобто можна буде за наявними даними щодо хмари забруднення повернутися в часі, відновлюючи інформацію про викиди від конкретних джерел. Це дасть змогу не лише виявляти неконтрольовані чи незаконні викиди забруднюючих речовин, а й покращити інвентаризацію викидів, що наразі є дуже важливим і для планування розвитку суспільства, і для вдосконалення моделей, оскільки поліпшуватимуться початкові вхідні дані. Вже зараз у світі активно вивчаються можливості залучення методів машинного навчання до аналізу даних супутникового моніторингу, що дозволить перейти від даних щодо загального вмісту речовини-забруднювача до концентрацій її у приземному шарі атмосфери — а це вже можливість реалізувати систему оповіщення населення про перевищення допустимих рівнів забруднення атмосферного повітря без необхідності мати дані наземного моніторингу (тобто моніторинг можна буде здійснювати в будь-якій точці на будь-якій території).

З розвитком супутникових методів моніторингу забруднення атмосферного повітря автори передбачають розширення міждисциплінарних досліджень. Від найбільш актуальних, які стосуються здоров'я населення, впливу забруднення на сільськогосподарські культури, лісові насадження, формування кислотних дощів з подальшим впливом на ґрунти тощо, до досить специфічних, як наприклад, оцінка інтенсивності впливу забруднюючих речовин на корозію будівельних матеріалів і руйнування культурних пам'яток, дослідження фотохімічних процесів в атмосфері та ін.

Перспективами дослідження викидів тепла і автоматичного виявлення пожеж є не тільки реалізація кліматичного обслуговування, тобто фіксація та інтерпретація даних про ландшафтні займання. Новим етапом стане створення моделей на основі виявлених просторових і часових особливостей поширення цих даних, яке дозволить реалізувати нове покоління сервісів — так звані «розумні» сервіси. В контексті обговорюваної в монографії теми такі «розумні» сервіси зможуть відображати ймовірні пожежі на конкретній території в певний інтервал часу. Наприклад, великим займанням

зазвичай передує серія дрібних, як це було в Луганській і Донецькій областях; спалювання стерні на полях починається з півдня України в березні і закінчується у квітні в північних регіонах; пожежі у заповідниках з певних причин найчастіше стаються у вихідні дні.

Моніторинг компонентів природного середовища за допомогою супутникових спостережень і автоматичних картографічних систем відкриває нову сторінку в географічних дослідженнях. Регулярне (щоденне) надходження даних, охоплення територій цілих континентів, автоматичне виділення ділянок, що потребують уваги, — все це раніше потребувало поєднання зусиль великих колективів вчених з різних галузей науки. На сьогодні розроблення таких автоматизованих систем уже під силу і невеликій групі фахівців, про що свідчить досвід авторів цієї монографії.

Спеціалізовані автоматизовані системи для моніторингу довкілля можуть бути розгорнуті для вивчення низки природних явищ, особливостей антропогенного впливу на природне середовище, наслідків ведення бойових дій, якості життя населення тощо. В поєднанні з мережами стаціонарних спостережень і краудсорсингом такого роду проєкти дозволять виконувати дослідження як на макро-, так і на мікрорівні, і з'ясовувати досі невідомі механізми та закономірності перебігу природних процесів.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Alkhatib Ahmad A.A. A Review on Forest Fire Detection Techniques. *International Journal of Distributed Sensor Networks*. 2014. Article ID 597368. https://doi.org/10.1155/2014/597368

2. Barmpoutis P., Papaioannou P., Dimitropoulos K., Grammalidis N. A review on early forest fire detection systems using optical remote sensing. *Sensors*. 2020. Vol. 20, No. 22. ID. 6442. https://doi.org/10.3390/s20226442

3. Sungheetha A., Sharma R.R. Real Time Monitoring and Fire Detection using Internet of Things and Cloud based Drones. *Journal of Soft Computing Paradigm*. 2020. Vol. 2, No. 3. P. 168—174. https://doi.org/10.36548/jscp.2020. 3.004

4. Burke C., Wich S, Kusin K. et al. Thermal Drones as a Safe and Reliable Method for Detecting Subterranean Peat Fires. *Drones*. 2019. Vol. 3, No. 1. P. 23. https://doi.org/10.3390/drones3010023

5. Yuan C., Zhang Y., Liu Z. A survey on technologies for automatic forest fire monitoring, detection, and fighting using unmanned aerial vehicles and remote sensing techniques. *Canadian Journal of Forest Research*. 2015. Vol. 45. P. 783—789. https://doi.org/10.1139/cjfr-2014-0347

6. Белоусов К.Г., Свинаренко Д.Н., Хорошилов В.С. и др. Использование дневных и ночных снимков видимого и инфракрасного диапазонов для мониторинга лесных пожаров. *Космічна наука і технологія*. 2018. Т. 24, № 6. С. 30—40. https://doi.org/10.15407/knit2018.06.030

7. Jang E., Kang Y., Im J., Lee D.-W., Yoon J., Kimet S.-K. Detection and Monitoring of Forest Fires Using Himawari-8 Geostationary Satellite Data in South Korea. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, No. 3. P. 271. https://doi.org/10.3390/rs11030271

8. Allison R.S., Johnston J.M., Craig G., Jennings S. Airborne optical and thermal remote sensing for wildfire detection and monitoring. *Sensors*. 2016. Vol. 16, No. 8. P. 1310. https://doi.org/10.3390/s16081310

9. Varotsos C.A., Krapivin V.F., Mkrtchyan F.A. A New Passive Microwave Tool for Operational Forest Fires Detection: A Case Study of Siberia in 2019. *Remote Sensing*. 2020. Vol. 12, No.5. P. 835. https://doi.org/10.3390/rs12050835

10. Савенець М.В., Осадчий В.І., Орещенко А.В. Лісові пожежі квітня 2020 року та зумовлені ними зміни якості атмосферного повітря в Україні. *Вісник НАН України*. 2020. № 5. С. 80—89. https://doi.org/10.15407/visn2020.05.080

11. Agranat V. Perminov V. Mathematical modeling of wildland fire initiation and spread. *Environmental Modelling & Software*. 2020. Vol. 125. P. 104640. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104640

12. Смотр О.О., Грицюк Ю.І. Моделювання контурів лісових пожеж. *Пожежна безпека*. 2012. Вип. 20. С. 169—179.

13. Путренко В.В. Інтелектуальний аналіз небезпеки виникнення природних пожеж на основі геоінформаційних технологій. *Технологический аудит и резервы производства*. 2016. Т. 4, № 3. С. 67—72. https://doi.org/10.15587/2312-8372.2016.76154

14. Балабух В.О., Зібцев С.В. Вплив зміни клімату на кількість та площу лісових пожеж у північно-чорноморському регіоні України. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2016. № 18. С. 60—71. https://doi.org/10.31481/uhmj.18.2016.07

15. Zhang G., Wang M., Liu K. Forest Fire Susceptibility Modeling Using a Convolutional Neural Network for Yunnan Province of China. *International Journal of Disaster Risk Science*. 2019. Vol. 10. P. 386—403. https://doi.org/10.1007/s13753-019-00233-1

16. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2018 році. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. https://mepr.gov.ua/news/35937.html

17. Гулак О.В. Уроки природного лиха: наслідки лісових пожеж поблизу Чорнобиля. *Юридичний науковий електронний журнал*. 2015. № 5. С. 114—117.

18. The Television Infrared Observation Satellite Program (TIROS). https://science.nasa.gov/missions/tiros

19. Advanced very-high-resolution radiometer. https://en.wikipedia.org/wiki/Advanced_very-high-resolution_radiometer

20. Fire Information for Resource Management System. https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/

21. Vermote E.F., Roger J.C., Ray J.P. MODIS Surface Reflectance User's Guide. https://modis-land.gsfc.nasa.gov/pdf/MOD09_UserGuide_v1.4.pdf

22. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. https://modis.gsfc.nasa.gov/

23. Cao C., Xiong X., Wolfe R. et al. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS) Sensor Data Record (SDR) User's Guide. https://nsidc.org/sites/default/files/viirs-sdr-users-guide.pdf

24. Савков П., Левінськова Н., Бондарчук Г., Постарниченко Н. Геоінформаційні системи в моніторингу лісових ресурсів. *Вісник Київського національного університету імені Тараса Шевченка. Військово-спеціальні науки,*. 2021. № 1. С. 71—75.

25. Live real time satellite tracking and predictions. https://www.n2yo.com.

26. Орещенко А.В., Осадчий, В.І., Савенець, М.В., Балабух В.О. Виявлення і моніторинг потенційно небезпечних пожеж на території України за даними супутникового сканування. *Вісник НАН України*. 2020. № 11. С. 33—44. https://doi.org/10.15407/visn2020.11.033.

27. Majewska P., Sobieszczyk J., Żarczyński A. Pożary w Biebrzańskim Parku Narodowym (kwiecień 2020). *Aura*. 2020. No. 7—8. P. 13—15.

28. Żarczyński A., Radzikowska A. Wiosenne wypalanie traw–karalne, szkodliwe dla środowiska, ale wciąż powszechne. *Eliksir*. 2020-2021. No. 10. P. 36—39. http://hdl.handle.net/11652/4304.

29. NASA Worldview. https://worldview.earthdata.nasa.gov.

30. Interactive World Forest Map. https://www.globalforestwatch.org/map.

31. Український державний портал дистанційного зондування Землі. http://portal.dzz.gov.ua.

32. Yakubailik O., Romas'ko V., Pavlichenko E. Complex for reception and real time processing of remote sensing data. *E3S Web Conf. Regional Problems of Earth Remote Sensing*. 2019. Vol. 75. P. 03003. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20197503003.

33. Open Street Map. https://www.openstreetmap.org.

34. Street Map Data Extracts. https://download.geofabrik.de.

35. Borsdorff T., aan de Brugh J., Hu H., Hasekamp O. et al. Mapping carbon monoxide pollution from space down to city scales with daily global coverage. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2018. Vol. 11, No 10. P. 5507—5518. https://doi.org/10.5194/amt-11-5507-2018.

36. Griffin D., Zhao X., McLinden C.A. et al. High-Resolution Mapping of Nitrogen Dioxide With TROPOMI: First Results and Validation Over the Canadian Oil Sands. *Geophysical Research Letters*. 2019. Vol. 46, No. 2. P. 1049—1060. https://doi.org/10.1029/2018GL081095.

37. Opio R. Mugume I., Nakatumba-Nabende J. Understanding the Trend of NO_2, SO_2 and CO over East Africa from 2005 to 2020. *Atmosphere*. 2021. Vol. 12, No. 10. P. 1283. https://doi.org/10.3390/atmos12101283.

38. Savenets M. Air pollution in Ukraine: a view from the Sentinel-5P satellite. *Idojaras*. 2021. Vol. 125, No. 2. P. 271—290. https://doi.org/10.28974/idojaras.2021.2.6.

39. Saw G.K., Dey S., Kaushal H., Lal K. Tracking NO_2 emission from thermal power plants in North India using TROPOMI data. *Atmospheric Environment*. 2021. Vol. 259. P. 118514. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118514.

40. Bai R., Xue Y., Jiang X., Jin C., Sun Y. Retrieval of High-Resolution Aerosol Optical Depth for Urban Air Pollution Monitoring. *Atmosphere*. 2022. Vol. 13, No. 5. P. 756. https://doi.org/10.3390/atmos13050756.

41. Algorithm theoretical basis document for the TROPOMI L01b data processor. Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), 2022. 186 p.

42. Apituley A., Pedergnana M., Sneep M., Veefkind J., Loyola D., Landgraf J., Borsdorff T. Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Carbon Monoxide. Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), 2022. 122 p.

43. Eskes H., van Geffen J., Boersma F., Eichmann K.-U., Apituley A., Pedergnana M., Sneep M., Veefkind J., Loyola D. Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Nitrogendioxide. Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), 2022. 168 p.

44. Romahn F., Pedergnana M., Loyola D., Apituley A., Sneep M., Veefkind J. Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Sulphur Dioxide SO_2. DLR, 2022. 152 p.

45. Romahn F., Pedergnana M., Loyola D., Apituley A., Sneep M., Veefkind J. Sentinel-5 precursor/TROPOMI Level 2 Product User Manual Formaldehyde HCHO. DLR, 2022. 122 p.

46. Landgraf J., de Brugh J., Scheepmaker R., Borsdorff T., Houweling S., Hasekamp O. Algorithm Theoretical Baseline Document for Sentinel-5 Precursor: Carbon Monoxide Total Column Retrieval. Netherlands Institute for Space Research, 2022. 83 p.

47. Van Geffen J., Eskes H., Boersma K., Maasakkers J., Veefkind J. TROPOMI ATBD of the Total and Tropospheric NO_2 Data Products. Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI), 2022. 88 p.

48. Eskes H.J., Boersma K.F. Averaging kernels for DOAS total-column satellite retrievals. *Atmos. Chem. Phys*. 2003. Vol. 3. P. 1285—1291. https://doi.org/10.5194/acp-3-1285-2003.

49. Kawka M., Struzewska J., Kaminski J.W. Spatial and Temporal Variation of NO_2 Vertical Column Densities (VCDs) over Poland: Comparison of the Sentinel-5P TROPOMI Observations and the GEM-AQ Model Simulations. *Atmosphere*. 2021. Vol. 12, No. 7. P. 896. https://doi.org/10.3390/atmos12070896.

50. von Clarmann T., Glatthor N. The application of mean averaging kernels to mean trace gas distributions. *Atmos. Meas. Tech*. 2019. Vol. 12. P. 5155—5160. https://doi.org/10.5194/amt-12-5155-2019.

51. Huijnen V., Williams J., van Weele M. et al. The global chemistry transport model TM5: description and evaluation of the tropospheric chemistry version 3.0. *Geosci. Model Dev.* 2010. Vol. 3. P. 445—473. https://doi.org/10.5194/gmd-3-445-2010.

52. Savenets M., Osadchyi V., Oreshchenko A., Pysarenko L. Air Quality Changes in Ukraine during the April 2020 Wildfire Event. *Geographica Pannonica*. 2020. Vol. 24, No. 4. P. 271—284. https://doi.org/10.5937/gp24-27436.

53. Savenets M., Pysarenko L. The impact of wildfires in Ukraine on carbon flux and air quality changes by carbon-containing compounds. EGU General Assembly 2021, online (19—30 Apr, 2021). EGU21-329. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-329.

54. Leuchner M., Ghasemifard H., Lüpke M., Ries L., Schunk C. Menzel A. Seasonal and Diurnal Variation of Formaldehyde and its Meteorological Drivers at the GAW Site Zugspitze. *Aerosol Air Qual. Res*. 2016. Vol. 16. P. 801—815. https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.05.0334.

55. Wu Y., Huo J., Yang G., Wang Y., Wang L., Wu S., Yao L., Fu Q., Wang L. Measurement report: Production and loss of atmospheric formaldehyde at a suburban site of Shanghai in summertime. *Atmos. Chem. Phys.* 2023. Vol. 23, No. 5. P. 2997–3014. https://doi.org/10.5194/acp-23-2997-2023.

56. Писаренко Л.А., Савенець М.В. Пожежі в екосистемах та вплив на атмосферу. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*. 2020. Вип. 53. С. 255—266. https://doi.org/10.26565/2410-7360-2020-53-19

57. Su W., Liu C., Chan K.L. et al. An improved TROPOMI tropospheric HCHO retrieval over China. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2020. Vol. 13. P. 6271—6292. https://doi.org/10.5194/amt-13-6271-2020

58. Potts D.A., Ferranti E.J.S., Timmis R, Brown A.S., Vande Hey J.D. Satellite Data Applications for Site-Specific Air Quality Regulation in the UK: Pilot Study and Prospects. *Atmosphere*. 2021.Vol. 12, No. 12. P. 1659. https://doi.org/10.3390/atmos12121659

59. Griffin D., McLinden C.A., Dammers E. et al. Biomass burning nitrogen dioxide emissions derived from space with TROPOMI: methodology and validation. *Atmospheric Measurements Techniques*. 2021. Vol. 14. P. 7929—7957. https://doi.org/10.5194/amt-14-7929-2021

60. Pseftogkas A., Koukouli M-E., Skoulidou I. et al. A New Separation Methodology for the Maritime Sector Emissions over the Mediterranean and Black Sea Regions. *Atmosphere*. 2021. Vol. 12, No. 11. P. 1478. https://doi.org/10.3390/atmos12111478

61. Queißer M., Burton M., Theys N. et al. TROPOMI enables high resolution SO_2 flux observations from Mt. Etna, Italy, and beyond. *Sci. Rep*. 2019. Vol. 9. P. 957. https://doi.org/10.1038/s41598-018-37807-w

62. Corradini S., Guerrieri L., Brenot H. et al. Tropospheric Volcanic SO_2 Mass and Flux Retrievals from Satellite. The Etna December 2018 Eruption. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, No. 11. P. 2225. https://doi.org/10.3390/rs13112225

63. Theys N., Brenot H., De Smedt I. et al. Global Monitoring of Volcanic SO_2 Degassing Using Sentinel-5 Precursor TROPOMI. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*. 2021. P. 1911—1914. https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9554664

64. Borsdorff T., aan de Brugh J., Pandey S. et al. Carbon monoxide air pollution on sub-city scales and along arterial roads detected by the Tropospheric Monitoring Instrument. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2019. Vol. 19, P. 3579—3588. https://doi.org/10.5194/acp-19-3579-2019

65. Ialongo I., Virta H., Eskes H., Hovila J., Douros J. Comparison of TROPOMI/Sentinel-5 Precursor NO_2 observations with ground-based measurements in Helsinki. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2020. Vol. 13. P. 205—218. https://doi.org/10.5194/amt-13-205-2020

66. Vigouroux C., Langerock B., Aquino C.A.B. et al. TROPOMI/S5P formaldehyde validation using an extensive network of ground-based FTIR stations. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2020. Vol. 13. P. 3751—3767. https://doi.org/10.5194/amt-13-3751-2020

67. Sha M.K., Langerock B., Blavier J.-F.L. et al. Validation of methane and carbon monoxide from Sentinel-5 Precursor using TCCON and NDACC-IRWG stations. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2021. Vol. 14. P. 6249—6304. https://doi.org/10.5194/amt-14-6249-2021

68. van Geffen J., Eskes H., Compernolle S. et al. Sentinel-5P TROPOMI NO_2 retrieval: impact of version v2.2 improvements and comparisons with OMI and ground-based data. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2022. Vol. 15. P. 2037—2060. https://doi.org/10.5194/amt-15-2037-2022

69. Verhoelst T., Compernolle S., Pinardi G. et al. Ground-based validation of the Copernicus Sentinel-5P TROPOMI NO_2 measurements with the NDACC ZSL-DOAS, MAX-DOAS and Pandonia global networks. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2021. Vol. 14. P. 481—510. https://doi.org/10.5194/amt-14-481-2021

70. Tack F., Merlaud A., Iordache M.-D. et al. Assessment of the TROPOMI tropospheric NO_2 product based on airborne APEX observations. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2021. Vol. 14. P. 615—646. https://doi.org/10.5194/amt-14-615-2021

71. Zhao T., Mao J., Simpson W.R. et al. Source and variability of formaldehyde (HCHO) at northern high latitude: an integrated satellite, ground/aircraft, and model study. *Atmos. Chem. Phys.* 2022. Vol. 22, No. 11. P. 7163—7178. https://doi.org/10.5194/acp-22-7163-2022

72. Zong H., Zeng Z.-C., Liu X. Constraining Anthropogenic Emission Sources from Tropomi: A Case Study in Northern China. IGARSS 2019. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2019. P. 7676—7679. https://doi.org/10.1109/IGARSS.2019.8899006

73. Kim H.C, Kim S., Lee S.-H., Kim B.-U., Lee P. Fine-Scale Columnar and Surface NO_x Concentrations over South Korea: Comparison of Surface Monitors, TROPOMI, CMAQ and CAPSS Inventory. *Atmosphere*. 2020. Vol. 11, No. 1. P. 101. https://doi.org/10.3390/atmos11010101

74. Borsdorff T., de Brugh J.A., Hu H. et al. Measuring Carbon Monoxide With TROPOMI: First Results and a Comparison With ECMWF-IFS Analysis Data. *Geophysical Research Letters*. 2018. Vol. 45, No. 6. P. 2826—2832. https://doi.org/10.1002/2018GL077045

75. Vellalassery A., Pillai D., Marshall J. et al. Using TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) measurements and Weather Research and Forecasting (WRF) CO modelling to understand the contribution of meteorology and emissions to an extreme air pollution event in India. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2021. Vol. 21. P. 5393—5414. https://doi.org/10.5194/acp-21-5393-2021

76. Chi Y., Fan M., Zhao Ch. et al. Machine learning-based estimation of ground-level NO_2 concentrations over China. *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 807. P. 150721. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150721

77. Liu S., Valks P., Pinardi G. et al. An improved TROPOMI tropospheric NO_2 research product over Europe. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2021. Vol. 14. P. 7297—7327. https://doi.org/10.5194/amt-14-7297-2021

78. Martínez-Alonso S., Deeter M., Worden H. et al. 1.5 years of TROPOMI CO measurements: comparisons to MOPITT and Atom. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2020. Vol. 13. P. 4841—4864. https://doi.org/10.5194/amt-13-4841-2020

79. Guan J., Jin B., Ding Y. et al. Global Surface HCHO Distribution Derived from Satellite Observations with Neural Networks Technique. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, No. 20. P. 4055. https://doi.org/10.3390/rs13204055

80. Sun W., Zhu L., De Smedt I. et al. Global Significant Changes in Formaldehyde (HCHO) Columns Observed from Space at the Early Stage of the COVID-19 Pandemic. *Geophysical Research Letters*. 2021. Vol. 48. P. e2020GL091265. https://doi.org/10.1029/2020GL091265

81. Fioletov V., McLinden C.A., Griffin D. et al. Anthropogenic and volcanic point source SO_2 emissions derived from TROPOMI on board Sentinel-5 Precursor: first results. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2020. Vol. 20. P. 5591—5607. https://doi.org/10.5194/acp-20-5591-2020

82. Klausner T., Huntrieser H., Aufmhoff H. et al. First airborne in situ SO_2 observations of two coal-fired power plants in Serbia and Bosnia-Herzegovina: Potential for top-down emission estimate and satellite validation. EGU General Assembly 2021, online, 19–30 Apr. 2021. EGU21-5912. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-5912

83. Koukouli M.-E., Michailidis K., Hedelt P. et al. Volcanic SO_2 Layer Height by TROPOMI/S5P; validation against IASI/MetOp and CALIOP/CALIPSO observations. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2022. Vol. 22. P. 5665—5683. https://doi.org/10.5194/acp-22-5665-2022

84. Savenets M., Dvoretska I., Nadtochii L., Zhemera N. Comparison of TROPOMI NO_2, CO, HCHO, SO_2 data against ground-level measurements in close proximity to large anthropogenic emission sources on the example of Ukraine. *Meteorological Applications*. 2022. Vol. 29, No. 6. https://doi.org/10.1002/met.2108

85. Руководство по контролю загрязнения атмосферы: руководящий документ РД 52.04.186-89. Государственный комитет СССР по гидрометеорологии. Москва. 1991. 695 с.

86. Дворецька І.В., Савенець М.В. Розробка баз аерологічних даних для території України. *Фізична географія та геоморфологія*. 2017. Вип. 85. С. 130—136.

87. Савенець М.В. Метод критичного контролю даних радіозондування атмосфери в області екстремальних відхилень. *Український гідрометеорологічний журнал*. 2019. № 24. С. 23—32. https://doi.org/10.31481/uhmj.24.2019.02

88. Hersbach H., Bell B., Berrisford P. et al. ERA5 hourly data on single levels from 1959 to present. *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*. 2018. https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47

89. Guo J., Zhang J., Yang K. et al. Investigation of near-global daytime boundary layer height using high-resolution radiosondes: first results and comparison with ERA5, MERRA-2, JRA-55, and NCEP-2 reanalyses. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2021. Vol. 21. P. 17079—17097. https://doi.org/10.5194/acp-21-17079-2021

90. Bralić M., Buljac M., Periš N. et al. Monthly and Seasonal Variations of NO_2, SO_2 and Black-smoke Located Within the Sport District in Urban Area, City of Split, Croatia. *Croatia Chemica Acta*. 2012. Vol. 85, No. 2. P. 139—145. http://dx.doi.org/10.5562/cca1966

91. Shah V., Jacob D.J., Li K. et al. Effect of changing NO_x lifetime on the seasonality and long-term trends of satellite-observed tropospheric NO_2 columns over China. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2020. Vol. 20. P. 1483—1495. https://doi.org/10.5194/acp-20-1483-2020

92. Voiculescu M., Constantin D.E., Condurache-Bota S. et al. Role of Meteorological Parameters in the Diurnal and Seasonal Variation of NO_2 in a Romanian Urban Environment. *International Journal of Environmental Research of Public Health*. 2020. Vol. 17. P. 6228. https://doi.org/10.3390/ijerph17176228

93. Garrett T., Zhao Ch., Novelli P. Assessing the relative contributions of transport efficiency and scavenging to seasonal variability in Arctic aerosol. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*. 2010. Vol. 62, No. 3. P. 190—196. https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2010.00453.x

94. Koike M., Jones N.B., Palmer P.I. et al. Seasonal variation of carbon monoxide in northern Japan: Fourier transform IR measurements and source-labeled model calculations. *Journal of Geophysical Research*. 2006. Vol. 111. D15306. https://doi.org/10.1029/2005JD006643

95. Rinsland C.P., Mahieu E., Zander R. et al. Free tropospheric CO, C_2H_6, and HCN above central Europe: Recent measurements from the Jungfraujoch station including the detection of elevated columns during. *Journal of Geophysical Research*. 2000. Vol. 105. P. 24235—24249. https://doi.org/10.1029/2000JD900371

96. Baird R.A. Pyro-Terrorism — the Threat of Arson-Induced Forest Fires as a Future Terrorist Weapon of Mass Destruction. *Studies in Conflict & Terrorism*. 2006. Vol. 29, No. 5. P. 415—428. https://doi.org/10.1080/10576100600698477

97. Finch F.R. This Land Is Our Land: The Environmental Threat of Army Operations. *International Law Studies*. 1996. Vol. 69. P. 99—115.

98. Гапон С.В., Путренко В.В. Моніторинг пожеж на території об'єднаних територіальних громад засобами геоматики. В кн.: *Екологія. Людина. Суспільство*: матер. XXI Міжнар. наук.-практ. конф. Київ, 2020. С. 283—284.

99. Зібцев С.В., Сошенський О.М., Гуменюк В.В., Корень В.А. Багаторічна динаміка лісових пожеж в Україні. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*. 2019. Т. 10, № 3. С. 27—40.

100. Орещенко А.В. Проєкт «Система моніторингу лісових пожеж»: як це зроблено? — технології та компетенції. В кн.: *Українське Полісся: проблеми та тренди сучасного розвитку*: матер. II Всеукр. наук.-практ. конф. (м. Ніжин, 10—11 лютого 2022 року). Ніжин, 2022. С. 110—114.

101. Жолобак Г.М. Вітчизняний досвід супутникового моніторингу лісових масивів України. *Космічна наука і технологія*. 2010. Т. 16, № 3. С. 46—54.

102. Дубровський В., Пархісенко Я.В., Петроченко О.Ю., Потапенко Л.С., Рябоконенко О.Д, Штепа Ю.Н. Космічний моніторинг лісових пожеж за знімками NOAA в УЦМЗР. *Космічна наука і технологія*. 2002. Т. 8. № 2–3. С. 246—248.

103. Ліщенко Л.П., Шевчук Р.М., Філіпович В.Є. Методика супутникового моніторингу торфовищ з метою визначення їх пожежонебезпечного стану та оцінювання ризиків виникнення пожеж на них. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2022. Т. 9, № 1. С. 17. https://doi.org/10.36023/ujrs.2022.9.1.210

104. Вишняков В.Ю., Нагаєвський В.М., Шелестюк Ю.О. Аналіз та реалізація моделей моніторингу підстильної поверхні за даними Suomi NPP. *Екологічна безпека та природокористування*. 2015. № 2. С. 87—94.

105. Khoir A.N. Ooi1 M.C.G., Liew J., Suradi, Kurniawan A., Ni'amillah A. MODIS-derived fire spatial and temporal distribution during haze season in Southeast Asia using empirical orthogonal function. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 880. P. 012003. https://doi.org/10.1088/1755-1315/880/1/012003

106. Wan C., Roy S.S. Geospatial characteristics of fire occurrences in southern hemispheric Africa and Madagascar during 2001–2020. *Journal of Forestry Research*. 2022. https://doi.org/10.1007/s11676-022-01487-0

107. Талерко М.М. Застосування величини FRP (Fire Radiative Power) для оцінки емісії радіонуклідів в атмосферу внаслідок лісових пожеж у зоні відчуження у квітні 2020 р. *Ядерна енергетика та довкілля*. 2020. № 4. С. 66—74. https://doi.org/doi.org/10.31717/2311–8253.20.4.8

108. Dinc P., Eklund L., Shahpurwal, A. et al. Fighting Insurgency, Ruining the Environment: the Case of Forest Fires in the Dersim Province of Turkey. *Human Ecology*. 2021. Vol. 49. P. 481—493. https://doi.org/10.1007/s10745-021-00243-y.

109. Dinc P. Forest Fires in Dersim and Sirnak. *Conflict and Environmental Destruction. Ecological solidarity and the kurdish freedom movement: Thought, practice, challenges, and opportunities*. Lund: Ecological Solidarity and the Kurdish Freedom Movement, 2021. 266 p.

110. Austin J.E., Bruch C.E. (Eds) *The Environmental Consequences of War: Legal, Economic, and Scientific Perspectives*. Cambridge : Cambridge University Press, 2007. 712 p.

111. Lawrence M.J., Stemberger H.L.J., Zolderdo A.J., Struthers D.P., Cooke S.J. The effects of modern war and military activities on biodiversity and the environment. *Environmental Reviews*. 2015. Vol. 23, No. 4. P. 443—460. https://doi.org/10.1139/er-2015-0039

112. Зібцев С.В., Миронюк В.В. Аналіз просторово-часових особливостей кількості та площ природних пожеж на території Східної України (окупованих територій). Київ. Регіональний Східноєвропейський центр моніторингу пожеж (REEFMC), Національний університет біоресурсів і природокористування України. 2018. nubip.edu.uasitesdefaultfilesu184osce_ato_fire_2013-2018_report.pdf

113. Постова А. Пожежі в екосистемах України через бойові дії. В кн.: *Проблеми раціонального використання соціальноекономічного, еколого-енергетичного, нормативно-правового потенціалу України та її регіонів*: тези II Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Луцьк, 1 червня 2022 р.). Луцьк: Волиньполіграф, 2022. 65 с.

114. Ichoku C.A. Kaufman J.Y. Method to Derive Smoke Emission Rates From MODIS Fire Radiative Energy Measurements. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2005. Vol. 43, No. 11. P. 2636—2649.

115. Sofiev M., Vankevich R., Lotjonen M. et al. An operational system for the assimilation of the satellite information on wild-land fires for the needs of air quality modelling and forecasting. *Atmos. Chem. Phys*. 2009. Vol. 9. P. 6833–6847. https://doi.org/10.5194/acp-9-6833-2009/

116. Vadrevu K. Lasko K. Intercomparison of MODIS AQUA and VIIRS I-Band Fires and Emissions in an Agricultural Landscape — Implications for Air Pollution Research. *Remote Sens*. 2018. Vol. 10. P. 978. https://doi.org/10.3390/rs10070978.

117. Зібцев С.В., Миронюк В.В., Богомолов В.В. та ін. Науково-методичне забезпечення створення геопорталу для оцінювання ризику, прогнозування та попередження природних пожеж в Україні. Київ: Наукова столиця, ФОП Шмидко Т.С., 2021. 340 с.

118. Бандурка О.І., Свинчук О.В. Метод ідентифікації космічних знімків для прогнозування лісових пожеж. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2022. Вип. 1. С. 13—18.

119. Wooster M.J., Zhukov B., Oertel D. Fire radiative energy for quantitative study of biomass burning: Derivation from the BIRD experimental satellite and comparison to MODIS fire products. *Remote Sens. Environ*. 2003. Vol. 86. P. 83–107.

120. Гнатушенко В.В., Гнатушенко Вік.В., Мозговий Д.К., Васильєв В.В. Технологія супутникового моніторингу наслідків лісових пожеж. *Науковий вісник НГУ*. 2016. № 1. С. 70–76.

121. Wooster M.J., Roberts G., Perry G.L.W., Kaufman Y.J. Retrieval of biomass combustion rates and totals from fire radiative power observations: FRP derivation and calibration relationships between biomass consumption and fire radiative energy release. *J. Geophys. Res. Atmos*. 2005. Vol. 110. https://doi.org/10.1029/2005JD006318.

122. Одум Ю. *Экология*. В 2 т. Пер. с англ. Москва: Мир, 1986. Т. 1. 327 с.

123. Дідух Я.П., Альошкіна У.М. Оцінка енергетичного балансу екосистем м. Києва та його зеленої зони. *Український фітоценологічний збірник*. 2007. Вип. 25. С. 48—56.

124. Масікевич Ю.Г., Солодкий В.Д., Масікевич А.Ю., Моісеєв В.Ф. Оцінка енергетичного потенціалу лісонасаджень Чернівецької області. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. 2012. Вип. 39. С. 12—135.

125. Василишин Р.Д., Домашовець Г.С. Фітомаса та депонований вуглець лісів Львівської області в контексті лісорослинного районування. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2008. Вип. 18. С. 50—58.

126. Дебринюк Ю.М. Технологічні аспекти створення і вирощування плантаційних лісових культур ялини європейської у Західному регіоні України. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*. 2011. Вип. 9. С. 90—95.

127. Котець Г.І. Урожайність та хімічний склад зеленої маси і сіна із суміші тритикале з викою. *Науково-технічний бюлетень НДЦ біобезпеки та екологічного контролю ресурсів АПК*. 2016. Т. 4, № 2. С. 58—62.

128. Орлова Л.Д. Врожайність лучних фітоценозів лівобережного лісостепу України. *Вісник Дніпропетровського університету. Біологія. Екологія*. 2012. Т. 20, № 2. С. 57—63.

129. Фурдичко О.І., Кучма М.Д., Дребот О.І., Яремко О.П. Екологічна оцінка запасів фітомаси в зоні відчуження і запасу в ній радіонуклідів. *Збалансоване природокористування*. 2021. № 3. С. 3—22.

130. Дідух Я. Енергетичні проблеми екосистем і забезпечення сталого розвитку України. *Вісник НАН України*. 2007. № 4. С. 3—12.

131. Гетман Н.Я. Циганський В.І. Продуктивність люцерни посівної залежно від вапнування ґрунту та обробки насіння в умовах Лісостепу Правобережного. *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія: Агрономія і біологія*. 2014. Вип. 3. 139 с.

132. Кургак В., Волощук М., Карбівська У., Мартищук В. Вплив поверхневого поліпшення гірських і заплавних луків Карпат на їх продуктивність та якість корму. *Вісник аграрної науки*. 2020. Т. 98, № 6. С. 22—30.

133. Воробйов Є.О., Паскевич С.А. Біотопічна приуроченість чорнобильської популяції коня Пржевальського Equus ferus przewalskii poljakov, 1881. *Вісті Біосферного заповідника «Асканія-Нова»*. 2019. Вип. 21. 168 с.

134. Солодушко М.М. Тривалість осінньої вегетації та врожайність пшениці озимої. *Бюлетень Інституту зернового господарства*. 2011. Вип. 40. С. 32—35.

135. Ткачук О.П. Потенціал біомаси побічної продукції рослинництва для удобрення ґрунту. В кн.: Scientific achievements of modern society. Proc. IX Int. Sci. Conf. (April 28—30, 2020, Liverpool). С. 1069—1076.

136. Колесник В М., Хом'як І.В. Динаміка надземної фітомаси рослинних угруповань прирічкових чагарників Центрального Полісся. В кн.: *Сталий розвиток країни в рамках*

Європейської інтеграції: тези Всеукр. наук.-практ. конф. (27 жовтня 2016 р.). Житомир: ЖДТУ, 2016.

137. Боч М.С., Мазинг В.В. *Экосистемы болот СССР*. Ленинград: Наука, 1979. 187 с.

138. Чорногор Л.Ф., Некос А.Н., Тітенко А.В., Чорногор Л.Л. Екологічні наслідки великомасштабних лісових пожеж в Україні навесні–влітку–восени 2020 р. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2021. Вип. 24. С. 79—90.

139. Чорногор Л.Ф., Некос А.Н., Тітенко Г.В., Чорногор Л.Л. Екологічні наслідки горіння лісових масивів у північній півкулі в 2020 р.: результати моделювання та кількісних розрахунків. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія «Екологія»*. 2021. Вип. 24. С. 42—54.

140. Ichoku C., Martins J.V., Kaufman Y.J., Wooster M.J., Freeborn P.H., Hao W.M., Baker S., Ryan C.A., Nordgren B.L. Laboratory investigation of fire radiative energy and smoke aerosol emissions. *J. Geophys. Res*. 2008. Vol. 113. P. D14S09. https://doi.org/10.1029/ 2007JD009659

141. Кузьменко Ю.И., Лев Т.Д., Тищенко О.Г., Пискун В.Н., Гавловская Л.В. Гис-подход к решению задачи прогнозирования развития природных пожаров в Чернобыльской зоне отчуждения на основе модели Ротермела. *Ядерна енергетика та довкілля*. 2020. Вип. 2. С. 79–94.

142. Kaiser J., Flemming J., Schultz M.G., Suttie M., Wooster M.J. The MACC Global Fire Assimilation System: First Emission Products (GFASv0). Technical Memorandum. 2009. No. 596. https://doi.org/10.21957/61tm14m3j

143. Талерко М. М., Лев Т. Д., Ковалець І. В., Яценко Ю. В. Моделювання атмосферного розповсюдження радіоактивності, винесеної в повітря в результаті лісових пожеж у зоні відчуження у квітні 2020 р. *Ядерна енергетика та довкілля.* 2020. Вип. 18. С. 86—104.

144. Зєлик Я.І., Куссуль Н.М., Шелестов А.Ю., Яйлимов Б.Я. Аналітичний огляд європейських проектів LUCAS і CORINE для моніторингу та валідації земного покриву і землекористування на основі супутникових та наземних спостережень та досвід картографування земного покриву в Україні. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2017. № 12. С. 10—36.

145. Путренко В.В. Інтелектуальний аналіз земного покриву території України на основі даних Globeland 30. *Вісник Астрономічної школи*. 2016. Т. 12, № 1. С. 77—85.

146. Protsak V, Voitsekhovich O, Laptev G. Estimation of radioactive source term dynamics for atmospheric transport during wildfires in Chernobyl zone in spring 2020. Ukrainian Hydrometeorological Institute (in Ukrainian). https://uhmi. org. ua/msg/fire2020/analytical. pdf.

147. Ландін В.П., Тищенко О.Г., Гуреля В.В., Кучма Т.Л., Фещенко В.П. Вплив лісових пожеж на рослинний покрив радіоактивно забруднених територій. *Агроекологічний журнал*. 2021. № 1. С. 68—80.

148. Кузьменко Ю. І., Гавловська Л. В. Лев Т. Д. Моделювання ландшафтних пожеж в Чорнобильській зоні відчуження на основі ГІС-технологій. У кн.: *Проблеми зняття з експлуатації об'єктів ядерної енергетики та відновлення навколишнього середовища (INUDECO 21)*. Чернігів : Чернігівська політехніка, 2021. С. 148—151.

149. Барабаш О.В., Бандурка О.І., Шпурик В.В. Свинчук О.В. Інформаційна система аналізу геоданих для відслідковування змін рослинності. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. Т. 5, № 4. С. 17—25.

150. Шестопалов В.М. Створення геологічного сховища радіоактивних відходів — найважливіше завдання щодо ліквідації наслідків Чорнобильської аварії: стенограма доповіді на засіданні Президії НАН України 28 квітня 2021 року. *Вісн. НАН України*. 2021. № 7. С. 37—42. https://doi.org/10.15407/visn2021.07.037

151. Сошенський О. М., Зібцев С. В., Терентьєв А. Ю., Воротинський О. Г. Наслідки катастрофічних ландшафтних пожеж в Україні для лісових екосистем та населення. *Український журнал лісівництва та деревинознавства*. 2021. Т. 12, № 3. С. 21—34. https://doi.org/10.31548/forest2021.03.002

The monograph contains an analysis of the spatio-temporal distribution of fire hotspots, potentially dangerous wildfires and atmospheric air pollution based on remote sensing data of the territory of Ukraine. It describes the technical and scientifically-applied aspects of the data using of satellite monitoring including the developed automatic monitoring systems of the above indicators. The monograph describes how monitoring systems were used during the full-scale Russian military invasion of Ukraine.

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

ДЕРЖАВНА СЛУЖБА УКРАЇНИ З НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ
НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ГІДРОМЕТЕОРОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

ОСАДЧИЙ Володимир Іванович
ОРЕЩЕНКО Андрій Васильович
САВЕНЕЦЬ Михайло Валерійович

СУПУТНИКОВИЙ МОНІТОРИНГ ПОЖЕЖ І ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ

Оригінал-макет: *А.В. Орещенко*

Підписано до друку 18.01.2023. Формат 70x100/16.
Папір офсетний. Друк цифровий. Умовн. друк. арк. 20,64.
Тираж 100 прим. Зам. № 108.

Виготовлено ТОВ «Видавництво «Ніка-Центр». 03142, Київ, вул. Кржижановського, 4.
т. +38 096 7727710; +38 066 1822133; e-mail:psyhea9@gmail.com
Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції ДК №5368 від 27.06.2017

ISBN 5-8459-0906-6