

МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ НАФТОГАЗОВОГО КОМПЛЕКСУ НА СТАН ДОВКІЛЛЯ (НА ПРИКЛАДІ КАРПАТСЬКОГО РЕГІОНУ)

Давибіда Л.І., Карпінський Б.В.

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, 76019, м. Івано-Франківськ
lidia.davybida@nung.edu.ua, karpinskijbohdan@gmail.com

У роботі розглянуто сучасні інструменти моніторингу навколишнього природного середовища на основі геоінформаційних систем і технологій, у першу чергу – на основі даних дистанційного зондування Землі. Згадані інструменти є універсальними засобами для оцінки екологічного стану територій при проведенні досліджень регіонального, національного і глобального масштабів. Сучасний розвиток можливостей глобального супутникового моніторингу дозволяє ефективно використовувати дані дистанційного зондування, отримані з різних супутників і розміщені на веб-платформах з відкритим доступом, і для спостереження за об'єктами нафтогазового комплексу, що має значний вплив на геологічне середовище, особливо у районах довготривалого видобутку вуглеводнів (нафти і газу). На теренах Карпатського регіону видобуток нафти і газу розпочався ще у другій половині XIX століття. На сьогодні в межах регіону розташовано близько 6000 ліквідованих і законсервованих нафтогазових свердловин, які є потенційно небезпечними для довкілля, оскільки часто є джерелами загазованості і нафтовиливів. Слід зазначити, що єдиної методики визначення зон вуглеводневого забруднення, джерелом якого є гірничі виробки та ліквідовані або законсервовані свердловини, для території регіону на даний час не існує. Авторами розглянуто функціональні можливості веб-ресурсів Національного управління з аеронавтики і дослідження космічного простору (NASA), Європейського космічного агентства (ESA) і корпорації Google, які надають відкритий доступ до результатів глобальних спостережень, що можуть бути використані для комплексної оцінки забруднення довкілля із застосуванням геоінформаційних систем (ГІС). На основі хмарної геоінформаційної платформи Google Earth Engine, даних, отриманих за допомогою супутникової місії Sentinel-5, і розробленого авторами алгоритму створено інтерактивні картографічні моделі забруднення атмосферного повітря досліджуваної території метаном (CH₄). Побудований графік середньомісячних показників вмісту метану (CH₄) в атмосфері над територією Карпатського регіону, підтверджує суттєве зростання рівня забруднення протягом п'ятирічного періоду спостережень у 2019–2023 роках. Отримані результати є основою для подальшої модернізації та розвитку системи моніторингу довкілля і розробки концепції відновлення території відповідно до завдань декарбонізації і досягнення цілей сталого розвитку. *Ключові слова:* супутниковий моніторинг, метан, геологічне середовище, геоінформаційні системи, Sentinel-5 TROPOMI.

Potential for using remote sensing data to study the impact of the oil and gas sector on the environment (the case of the Carpathian region). Davybida L., Karpinskiy B.

The article considers modern tools for environmental monitoring based on geographic information systems and technologies, primarily on the basis of remote sensing data. These tools are universal for assessing the ecological state of territories when carrying out research on a regional, national and global scale. The current development of global satellite monitoring capabilities makes it possible to effectively use remote sensing data received from various satellites and stored on open access web platforms to monitor oil and gas facilities that have a significant impact on the geological environment, especially in areas of long-term hydrocarbon (oil and gas) exploration. Oil and gas production in the Carpathian region began in the second half of the nineteenth century. Today, there are around 6000 abandoned and mothballed oil and gas wells in the region, which are potentially hazardous to the environment as they are often sources of gas pollution and oil spills. It should be noted that there is currently no unified methodology for identifying areas of hydrocarbon pollution caused by mines and abandoned or mothballed wells in the region. The authors consider the functionality of the web resources of the National Aeronautics and Space Administration (NASA), the European Space Agency (ESA) and Google Corporation, which provide open access to the results of global observations that can be used for a comprehensive assessment of environmental pollution using geographic information systems (GIS). Based on the Google Earth Engine cloud geoinformation platform, data obtained from the Sentinel-5 satellite mission, and an algorithm developed by the authors interactive mapping models of methane (CH₄) air pollution of the study area were created. The graph of average monthly atmospheric methane (CH₄) over the territory of the Carpathian region confirms a significant increase in the level of pollution over the five-year observation period in 2019–2023. The results obtained are the basis for further modernisation and development of the environmental monitoring system and the development of a concept for the restoration of the territory in accordance with the objectives of decarbonisation and achievement of sustainable development goals. *Key words:* satellite monitoring, methane, geological environment, geoinformation system, Sentinel-5 TROPOMI.

Постановка проблеми. Транскордонна територія Карпатського регіону (рис. 1), до якого прийнято відносити Львівську, Івано-Франківську, Закарпатську та Чернівецьку області, в межах яких розташовані Українські Карпати, характеризується значним

техногенним навантаженням [1]. Суттєвий внесок у забруднення довкілля і порушення екологічного стану геологічного середовища здійснюють об'єкти нафтогазового комплексу, оскільки видобуток нафти і газу в межах території дослідження розпочався

ще у XIX столітті. За підрахунками [2] у регіоні на сьогодні знаходиться біля 6000 законсервованих або ліквідованих нафтогазових свердловин, які є потенційними джерелами забруднення атмосферного повітря, ґрунтів, поверхневих та підземних вод за рахунок фільтрації вуглеводнів та викидів природного газу, основним складником якого є метан (CH_4).

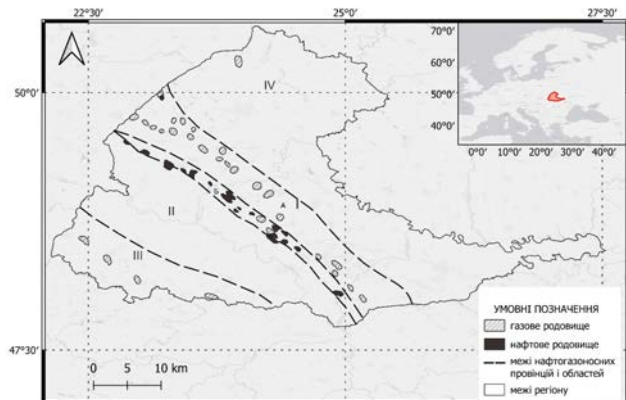


Рис. 1. Розташування території досліджень і Західноукраїнський нафтогазоносний регіон за [3]: нафтогазоносні області (тектонічні елементи): I – Передкарпатська (А – Більче-Волицька газонасна зона, Б – Бориславсько-Покутська газонафтоносна зона); II – Складчастих Карпат; III – Закарпатська; IV – Волино-Подільська)

Актуальність дослідження. Дистанційне зондування вже віддавна ефективно використовується для геологічного картографування, визначення стану ґрунтового покриву, оцінки впливу на навколишнє середовище, виявлення нафтового забруднення шельфу та моніторинг розливів нафти у акваторіях. Із запуском програми Copernicus Європейського космічного агентства, в межах якої підтримуються моніторингові місії оптичних та супутників, а також американського супутника Landsat 8 та інших (наприклад, супутникових місій таких організацій, як RADARSAT, Planet Labs і ICEYE) велика кількість актуальних і часто безкоштовних даних дають змогу набагато точніше та швидше проводити систематичні дослідження у великих масштабах [4]. Дані, отримані за допомогою цих супутників, успішно застосовуються для моніторингу впливу об'єктів нафтогазового комплексу на всі без винятку компоненти довкілля. На сьогодні актуальним завданням є інтеграція супутникових даних у середовищі геоінформаційних систем і створення ефективних алгоритмів обробки та інтерпретації доступної геопросторової інформації, зокрема із застосуванням хмарних обчислень.

Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями. Метан (CH_4) є другим за поширеністю після вуглекислого газу (CO_2) парниковим газом антропогенного похо-

дження. За даними Управління з охорони довкілля США (U.S. Environmental Protection Agency, EPA) на нього припадає близько 16% глобальних викидів [5]. Здатність метану утримувати тепло в атмосфері більш ніж у 28 разів сильніша порівняно із вуглекислим газом. За останні два століття концентрація метану в атмосфері зростає більш ніж удвічі, в основному через техногенний вплив, зокрема – через видобуток та транспортування нафти і газу. Оскільки метан є сильним парниковим газом і його життєвий цикл у атмосфері є коротшим порівняно з вуглекислим газом, досягнення значних скорочень викидів матиме швидкий і значний вплив на розвиток процесів глобального потепління [6].

Дистанційне зондування дозволяє швидко виявляти можливі витіки метану і визначати масштаби аварій та їхнього впливу на навколишнє середовище, а отже – є незамінним інструментом для отримання оперативної інформації для прийняття управлінських рішень і розробки рекомендацій для створення екологічної системи управління природними ресурсами і забезпечення промислової безпеки. Зокрема, супутникові знімки і продукти їх аналізу необхідні для виявлення районів розвитку небезпечних геологічних, техногенних і природних процесів і явищ, моніторингу деформації земної поверхні за даними космічної радіолокації, інвентаризації та паспортизації забруднених і порушених земель і водойм, створення екологічних схематичних карт, у тому числі й інтерактивних, масштабу 1:25000 і дрібніше.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Враховуючи актуальність тематики, а також відкритий доступ до значної кількості даних дистанційного моніторингу (зокрема, Sentinel-1, 2, 5, Landsat-8, 9, MODIS та ін.) й інструментів для їх завантаження, візуалізації й аналізу (таких, як Earth Explorer, EO Browser, Copernicus Browser, NASA Giovanni, Google Earth Engine, тощо), інтерес дослідників і кількість відповідних публікацій щороку зростає [4, 7, 8]. Важливими є і дослідження із застосуванням ГІС і ДЗЗ [9, 10], спрямовані на оцінку впливу на довкілля України російської воєнної агресії, розробку шляхів відновлення і відбудови з урахуванням вимог екологічної модернізації промисловості і досягнення цілей декарбонізації.

Авторами [11] розроблено загальну методико-технологічну схему дистанційного моніторингу вуглеводневого забруднення геологічного середовища й оцінки ризиків виникнення надзвичайних ситуацій на ділянках довготривалого видобутку нафти і газу. У якості пілотних ділянок дослідження були розглянуті території розташування покинутих свердловин в районі міста Борислав. Також у роботі визначено головні об'єкти супутникового моніторингу стану забруднення навколишнього середовища України внаслідок впливу нафтогазового комплексу, серед яких і викиди забруднюючих речовин і парникових газів у атмосферу.

Поєднання супутникових спостережень, зокрема даних сенсора Sentinel-5 TROPOMI, і спостережень за допомогою наземних мереж має ряд переваг для моделювання і оцінки якості атмосферного повітря в районах видобутку вуглеводнів і може бути використано для складання прогнозів якості повітря, оперативної фіксації викидів природного газу та інших забруднювачів, моніторингу переносу і розсіювання забруднення в атмосфері [12, 13].

Недоліки використання даних ДЗЗ під час з'явлення та моніторингу вуглеводневого забруднення на суші окреслено в роботі [4]. Так, визначено, що обмеження полягають у недоступності для широкого загалу високоточних гіперспектральних зображень комерційних супутників, відсутності покриття сенсорами наявних бортових чи безпілотних літальних апаратів у віддалених місцевостях, а також у тому, що діапазони більшості гіперспектральних супутникових сенсорів не покривають основні канали поглинання світла вуглеводнями – 1730 і 2300 нм (рис. 2).

Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття. На сьогодні не існує єдиної методики визначення зон вуглеводневого забруднення, джерелом якого є гірничі виробки та ліквідовані або законсервовані свердловини. Відповідно для території Карпатського регіону, для якого характерна значна кількість недіючих свердловин, про багато з яких відсутня будь-яка інформація, є перспективним використання даних дистанційного моніторингу для виявлення і картографування забруднених територій для подальших, більш детальних досліджень за допомогою наземних спостережень і зйомки з БПЛА, наприклад, з використанням лазерних детекторів метану, GPS і LIDAR [2, 14].

Новизна. Уперше досліджено просторово-часову динаміку вмісту метану (CH_4) у атмосферному повітрі над територією Карпатського регіону засобами геоінформаційної платформи Google Earth Engine та даних супутникових спостережень місії Sentinel-5.

Методологічне або загальнонаукове значення. Вивчення вмісту метану (CH_4) у атмосферному повітрі для Карпатського регіону та його просторово-часового розподілу за допомогою ГІС та ДЗЗ сприяє доповненню до вже існуючих відомостей про чинники формування екологічного стану території дослідження.

Виклад основного матеріалу. У якості вхідних даних для дослідження були використані результати глобального моніторингу з просторовою роздільністю близько 1 км², отримані за допомогою сенсорів супутника Sentinel-5P TROPOMI протягом 2019–2023 років. Інструмент моніторингу TROPospheric (TROPOMI) є сенсором на борту супутника Copernicus Sentinel-5 Precursor, який виконує спостереження з високою просторово-часовою роздільною здатністю за станом атмосфери для визначення якості повітря, вмісту озону, інтенсивності ультрафіолетового випромінювання, а також моніторингу та прогнозування змін клімату.

Використаний набір даних Sentinel-5P OFFL CH_4 : Offline Methane забезпечує офлайн-зображення концентрації метану високої роздільної здатності у період спостережень 2019–2023 рр. TROPOMI використовує інформацію про поглинання з діапазону O₂ (760 нм) і спектрального діапазону SWIR для отримання даних щодо вмісту CH_4 в атмосфері.

При дослідженнях регіонального масштабу і розгляді досить тривалого часового періоду ана-

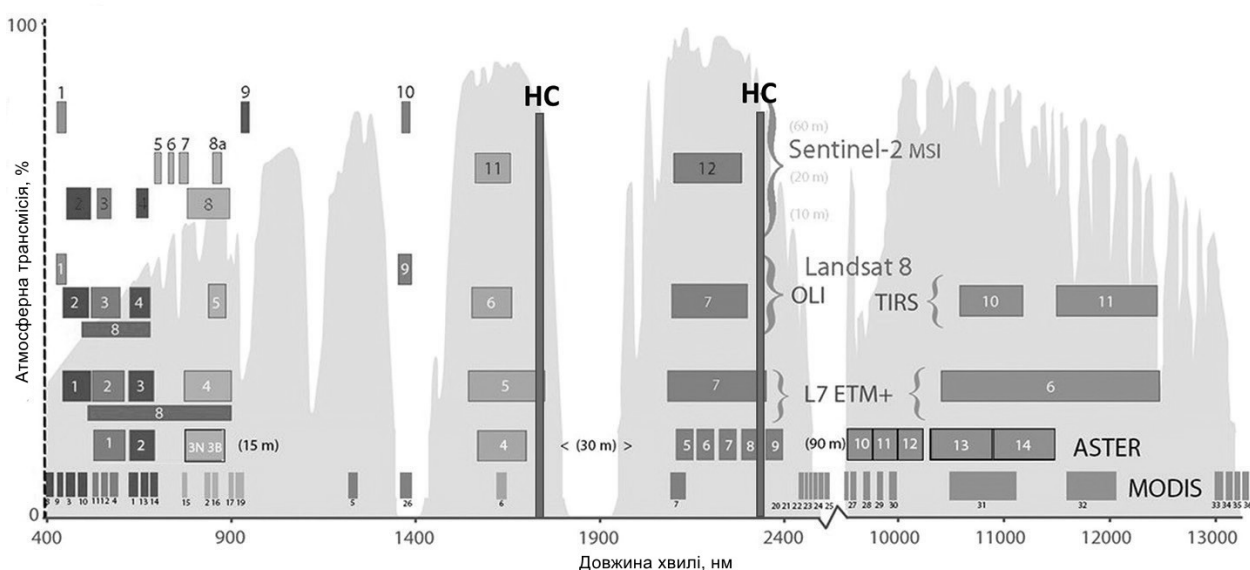


Рис. 2. Спектральні діапазони різних мультиспектральних оптичних супутників і основні смуги поглинання вуглеводнів (HC) за [4]

ліз супутникових зображень ускладнюється через потребу значних обчислювальних потужностей. Настільні геоінформаційні системи не дозволяють опрацювати одночасно петабайти даних супутникового моніторингу, проте збільшення простору для зберігання та демократизація доступу до онлайн-систем (сервери, хмар тощо) вирішують цю проблему.

Геоінформаційна хмарна веб-платформа Google Earth Engine пропонує зручний підхід для аналізу доступних глобальних супутникових даних спостережень за станом атмосфери, отриманих в тому числі за допомогою Sentinel-5 TROPOMI. Google Earth Engine дозволяє виконувати гнучкий аналіз, включаючи побудову середніх значень послідовних або не послідовних днів і обчислення добутку чи співвідношення змінних, а також виконувати просторове усереднення даних. Авторами розроблено і реалізовано програмний алгоритм, що дозволяє завантажити результати спостережень за вмістом метану у атмосферному повітрі, усереднити їх за період спостережень, вказаний користувачем, і візуалізувати результати у вигляді інтерактивних карт (рис. 3). Також передбачена можливість завантаження даних щодо щільності молекул метану ($n \cdot 10^{-9}$ мол./м²) у атмосферному повітрі у вигляді растрових зображень у форматі GEOTIFF.

Створений програмний код дає змогу також завантажити часовий ряд середньомісячних значень

щільності метану у атмосфері для території дослідження, створивши графік осереднених результатів щоденних спостережень сенсора TROPOMI для кожного місяця в період 2019–2023 рр. (рис. 4).

Автокореляційний аналіз отриманого часового ряду свідчить про наявність лінійного тренду (рис. 5 а), тоді як сезонна складова є статистично незначущою (рис. 5 б).

Виявлені просторово-часові закономірності є основою для проектування програми подальших досліджень для більш детального вивчення забруднення атмосферного повітря вуглеводневими газами із деградованих нафтогазових свердловин з метою підвищення рівня екологічної безпеки територій відпрацьованих нафтогазопромислів.

Головні висновки. Отже, ДЗЗ та ГІС є ефективними інструментами для моніторингу та вивчення впливу нафтогазовидобутку на довкілля. Застосування ДЗЗ дозволяє отримувати інформацію про стан довкілля та його компонентів на транскордонному, регіональному та локальному рівнях. Дані, отримані за допомогою ДЗЗ, можна поєднувати з даними наземних методів спостережень, а також з результатами геоінформаційного моделювання, що дозволяє комплексно визначати стан довкілля, прогнозувати його, та простежувати зміни в динаміці. Просторово-часове моделювання і створення інтерактивних карт Карпатського регіону на основі супутникових даних

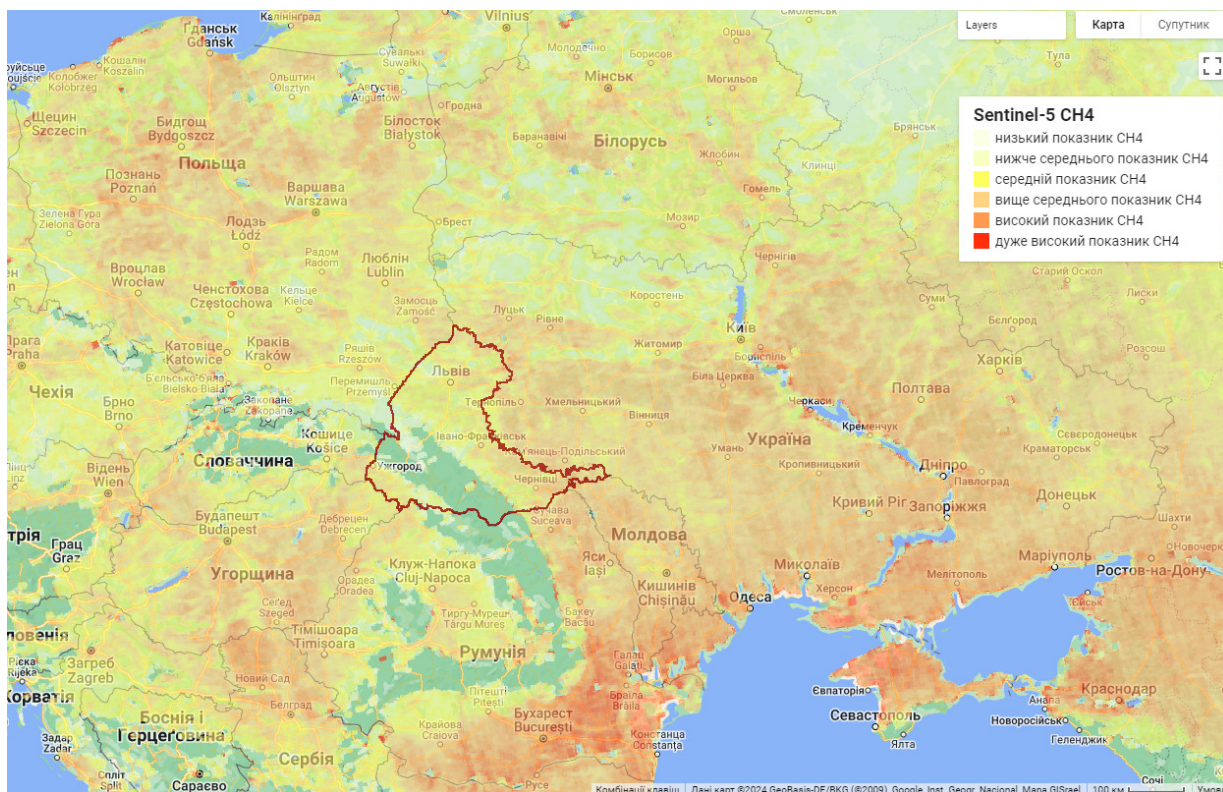


Рис. 3. Інтерактивна карта середньорічного вмісту метану (CH₄) в атмосферному повітрі, створена на основі даних спостережень Sentinel-5 за 2023 рік засобами платформи Google Earth Engine

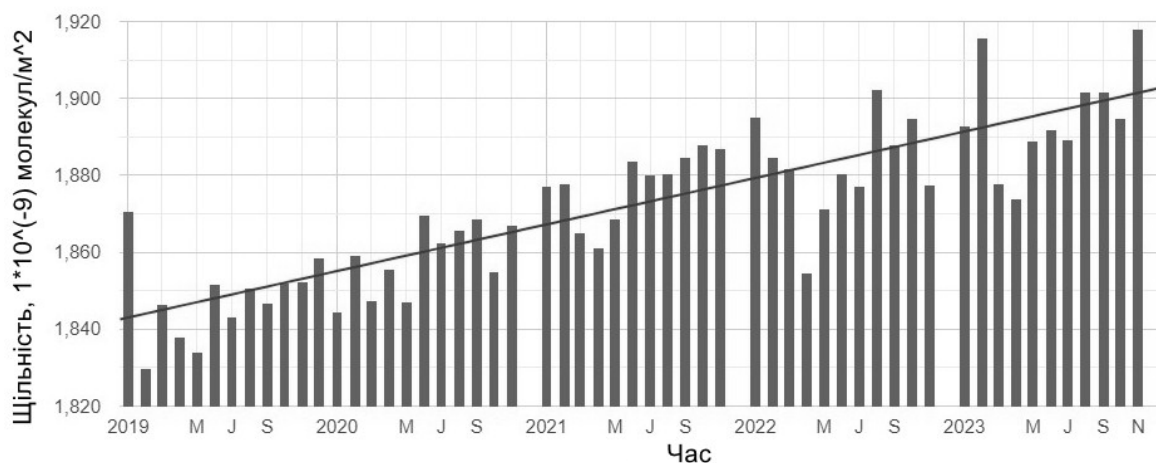


Рис. 4. Середньомісячні значення щільності метану, встановлені за даними Sentinel-5 в період 2019–2023

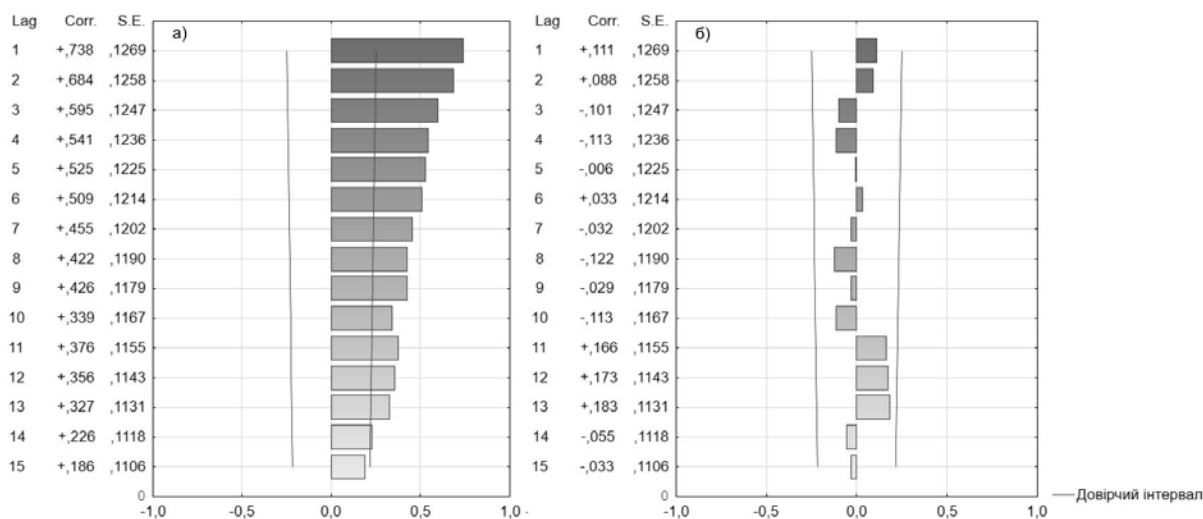


Рис. 5. Графік автокореляційної функції ряду до (а) і після (б) видалення тренду

Sentinel-5 TROPOMI засвідчують стійку тенденцію до зростання вмісту метану у атмосферному повітрі над територією дослідження.

Перспективи використання результатів дослідження. Отримані результати є важливою основою для розвитку системи моніторингу та впровадження конкретних заходів для відновлення території та зменшення впливу нафтогазового комплексу на довкілля в Карпатському регіоні. Отримані результати базуються на сучасних інструментах моніторингу на основі геоінформаційних систем і технологій дистанційного зондування Землі і мають значний

потенціал для використання у сфері охорони довкілля та розвитку регіону. Зокрема, вони можуть бути залучені для подальшого вирішення задач екологічного планування та управління, оскільки оперативний доступ до актуальної інформації про забруднення та його динаміку дозволяє вчасно реагувати на можливі негативні впливи та розробляти заходи для їх зменшення. Також отримані результати щодо забруднення атмосферного повітря метаном можуть бути використані для визначення пріоритетних завдань для розробки і реалізації концепції декарбонізації та зменшення викидів парникових газів у регіоні.

Література

1. Химинець В. В., Мікловда В.П., Пітюлич М.І., Гапак Н.М. Карпатський регіон у контексті сталого розвитку України. *Науковий вісник Ужгородського університету: Серія: Економіка*. 2012. № 3 (37). С. 40–45.
2. Мандрик О.М., Адаменко Я.О., Мосюк М.І., Карпінський Б.В., Бажалук Я.М., Шумєга С.В. Розроблення концепції очищення від забруднень, об'єктами нафтогазового комплексу Карпатського регіону України. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2020. № 1 (25). С. 31–41. [https://doi.org/10.31471/2415-3184-2022-1\(25\)-31-41](https://doi.org/10.31471/2415-3184-2022-1(25)-31-41)

3. Мончак Л. С., Анікеєв С. Г., Здерка Т. В. та ін. Про перспективи та проблеми нафтогазовидобування у Карпатському регіоні. *Нафтогазова галузь України*. 2016. № 1. С. 10–13.
4. Dubucq D., Turon L., Blanco B., Bideaud H. Earth observation remote sensing for oil and gas: A new era. *The Leading Edge*. 2021. V. 40. P. 26–34. <https://doi.org/10.1190/tle40010026.1>
5. Importance of Methane. U.S. Environmental Protection Agency. URL: <https://www.epa.gov/gmi/importance-methane> (дата звернення: 01.02.2024).
6. Leshchenko I. Estimates of methane emissions in the oil-and-gas industry of Ukraine: problems and world experience in their solution. *Science and Innovation*. 2021. V. 17(3), P. 37–48. <https://doi.org/10.15407/scine17.03.037>
7. Fingas M., Brown C.E. A Review of Oil Spill Remote Sensing. *Sensors*. 2018. V. 18(1). P. 91.
8. Lassalle G., Fabre S., Credoz A., et al. Monitoring oil contamination in vegetated areas with optical remote sensing: A comprehensive review. *Journal of Hazardous Materials*. 2020. V.393. P.122427.
9. Savenets M., Osadchy V., Komisar K. et al. Remotely visible impacts on air quality after a year-round full-scale Russian invasion of Ukraine. *Atmospheric Pollution Research*. 2023. V. 14(11). 101912. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101912>
10. Yatsenko V. V., Mohylna K. O. Analysis of the possibilities of application of synthetic aperture satellite radars for the post-war economic development of Ukraine. *Вісник Сумського державного університету. Серія Економіка*. 2022. № 4. С. 127–135.
11. Філіпович В. Є., Мичак А. Г., Кудряшов О. І., Шевчук Р. М. Дистанційний моніторинг стану вуглеводневого забруднення геологічного середовища і оцінка ризиків виникнення небезпечних ситуацій у районах тривалого нафтогазовидобування та компактного проживання населення. *Український журнал дистанційного зондування Землі*. 2020. № 26. С. 14–26.
12. Lu X., Xue Y., He B. et al. Studying the Regional Transmission of Air Pollution Based on Spatiotemporal Multivariable Data. *Atmosphere*. 2023. V. 14(9). 1438. <https://doi.org/10.3390/atmos14091438d>
13. Veefkind J.P., Aben I., McMullan K. et al. TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sensing of Environment*. 2012. V. 120. P. 70–83, <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027>
14. Conrad B.M., Tyner D.R., Li H.Z. et al. A measurement-based upstream oil and gas methane inventory for Alberta, Canada reveals higher emissions and different sources than official estimates. *Commun Earth Environ*. 2023. V. 4. 416. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-01081-0>