

DOI: 10.32347/2076-815x.2025.88.359-374

УДК 528.8

Плющ Т.М.,

pliushch.tm@knuba.edu.ua, ORCID 0000-0002-1271-935X,

Лініченко Т.М.,

lin_ta@ukr.net, ORCID 0009-0003-6000-3457,

Київський національний університет будівництва і архітектури

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА З ВИКОРИСТАННЯМ GOOGLE EARTH ENGINE

Розглянуто можливість проведення дослідження забруднення атмосфери України діоксидом азоту, діоксидом сірки, монооксидом вуглецю та метаном за допомогою засобів дистанційного зондування землі та платформи Google Earth Engine в період з 2019 до 2023 року.

Ключові слова: ДЗЗ; Google Earth Engine; Sentinel-5P; Copernicus; забруднення повітря; моніторинг; монооксид вуглецю; діоксид азоту; діоксид сірки; метан.

Вступ та постановка проблеми. Тема забруднення навколишнього природного середовища щороку стає все гострішою, оскільки стан повітря, ґрунтів, водних ресурсів впливає на наше здоров'я та здоров'я наших дітей. Для збереження довкілля та покращення його якості треба передусім знати його стан, тенденції до змін. На тлі воєнної агресії та неможливості в деяких регіонах нашої країни зробити дослідження наземними способами, все актуальнішими стають методи дистанційного зондування землі (ДЗЗ). Актуальність даної теми потребує розроблення методики аналізу стану повітря над територією України, яка дозволить швидко досліджувати динаміку змін концентрацій забруднюючих речовин за супутниковими даними.

Світова програма з моніторингу навколишнього середовища Copernicus дає можливість отримати необхідні дані для виконання подібних досліджень. Місія Sentinel-5P, створена для потреб цієї програми, виконує глобальні вимірювання слідів газів та аерозолів в атмосфері. Доступ до цих даних й можливість їхньої подальшої обробки на цьому ж ресурсі надає хмарна платформа Google Earth Engine (GEE), що є безкоштовним та зручним інструментом для досліджень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В нашій державі платформа GEE тільки починає займати своє важливе місце серед інструментів досліджень [1]. Українські вчені Л.І. Давибіда та Б.В. Карпінський проаналізували стан Карпатського регіону та вплив на нього нафтогазового комплексу [2, 3].

Науковці дослідили можливості платформи GEE для здійснення розрахунків індексів NDVI, MNDWI, NDBI та зробили аналіз наявності рослинного покриву, водойм, забудованих територій та створили графіки динаміки змін цих індексів [3] в даному регіоні. Так як в країні тривають військові дії, Л.І. Давибідою за допомогою платформи було проаналізовано вплив воєнних дій на якість повітря над Україною [4] за період 2021 та 2022 року та зроблені висновки щодо зміни його якості. Л. Єлістратова, О. Апостолов, А. Ходоровський та М. Тимчишин використовуючи дані про концентрацію діоксиду сірки за 5 років з 2019 по 2023 рік за допомогою GEE зробили комплексний геоінформаційний моніторинг цієї сполуки в атмосфері України [5]. Низка вчених з Китаю, Канади, Ірану та Бангладеш дослідили зміну концентрацій основних забруднювачів атмосфери та зв'язок якості повітря зі здоров'ям населення під час Covid-19 за допомогою GEE [10, 11, 12, 13]. Аналіз впливу урбанізації на якість повітря аналізували вчені з Тунісу та Саудівської Аравії [14]. Дослідженням тенденцій та боротьби з промисловими викидами атмосферних забруднювачів розглянули у своїй статті вчені Стенфордського університету [15]. Таким чином дистанційне вивчення забруднення атмосфери проводиться у всьому світі в тому числі і в нашій державі.

Мета і методи досліджень. Метою даної роботи є розробка та апробація алгоритму дистанційного аналізу стану навколишнього середовища, а саме моніторинг якості атмосферного повітря, за допомогою платформи Google Earth Engine з використанням даних супутників Sentinel-5P та географічної інформаційної системи з відкритим кодом QGIS.

Виклад основного матеріалу. На життя і здоров'я людини впливає безліч факторів в тому числі забруднене повітря [16]. В той же час саме людська діяльність забруднює атмосферу найбільше, а особливо небезпечним є забруднення промислових міст токсичними газами, такими як CO (монооксид вуглецю), NO₂ (діоксид азоту), SO₂ (діоксид сірки) та CH₄ (метан), що є другим за обсягом викидів парниковим газом в Україні.

Для дослідження забруднення атмосфери було обрано набори даних концентрацій газів CO, NO₂, SO₂, CH₄, зібрані супутником Sentinel 5P інструментом TROPOMI та база даних з тепловими електростанціями WRI/GPPD/power_plants. Дослідження обмежувалося територією України та часовим періодом у п'ять років з 2019 до 2023 року, щоб охопити період карантину через пандемію COVID-19 та початок повномасштабного вторгнення Росії.

Всі перераховані вхідні дані оброблялись за розробленою схемою методики використання GEE при дослідженні динаміки рівня концентрацій основних забруднювачів атмосфери, що наведена на рисунку 1. Результати

було візуалізовано у вигляді карт, графіків та діаграм, які в подальшому опрацьовувалися в QGIS та EXCEL для кращого сприйняття. В QGIS створено тематичні карти кількості забруднюючих речовин над територією України та карти трендів Кендалла, що є статистичним методом, який використовується для виявлення наявності тренду в часі в ряді даних. Даний тест використовують в аналізі екологічних, кліматичних та гідрологічних даних, де важливо оцінити чи спостерігається стійка зміна в даних (наприклад, підвищення концентрацій забруднювача, тощо) [20]. В Excel побудовано графіки середніх величин концентрацій газів.

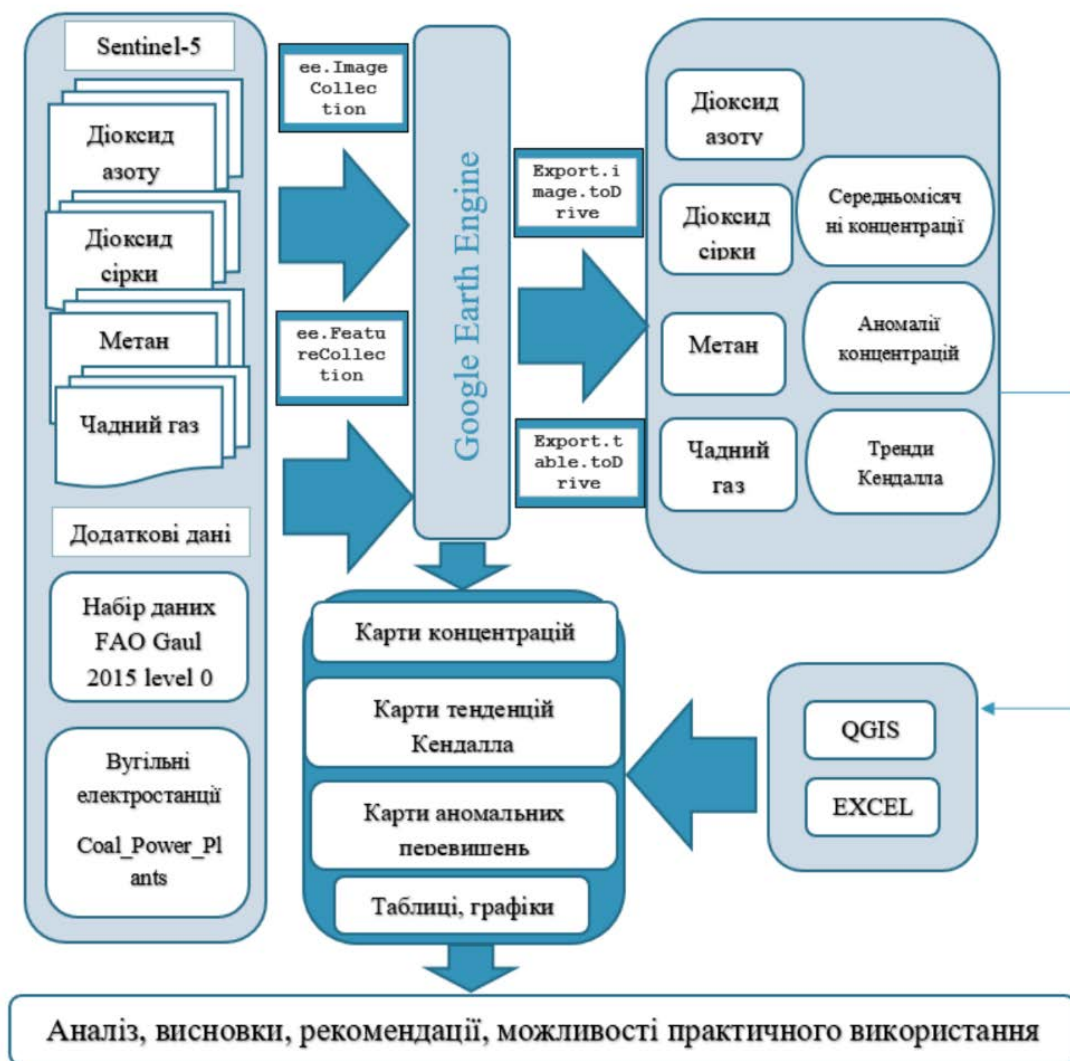


Рис.1. Схема дослідження динаміки рівня концентрацій основних забруднювачів атмосфери.

Дослідження забруднення метаном (CH₄). Джерела метану в Україні є природними: розклад органічного вуглецю у водно-болотних угіддях, діяльність тварин, наслідок лісових та торфових пожеж, викиди з геологічних джерел. Майже 70 % викиду метану в атмосферу привноситься діяльністю

людини через гниття органіки на сміттєзвалищах, від тваринництва, з відходів та стічних вод, від використання продуктів нафтопереробки, витоки нафти та газу, особливо під час руйнувань від військових дій.

Аналіз отриманих даних (рис. 2) показав найвищі концентрації метану в населених пунктах з розвиненим тваринництвом, птахівництвом, узбережжі річки Дніпро, значне перевищення на місці колишнього Каховського водосховища, а також узбережжя Чорного та Азовського морів. Основною причиною високих концентрацій в північній частині України є природне виділення метану на болотах, пожежі на торф'яниках, в центральній частині – можливими причинами є централізація сільськогосподарських підприємств: свинарство, птахівництво, зниження контролю за звалищами. На півдні України підвищення концентрації спостерігається вздовж річок, зрошувальних систем і є результатом забруднення водою фосфатами, які спричиняють цвітіння води, гниття органіки, в результаті чого виділяється метан. На сході нашої держави внаслідок ведення бойових дій було призупинено чи взагалі припинено видобування кам'яного вугілля, це призвело до тимчасового зниження концентрацій над цими територіями.

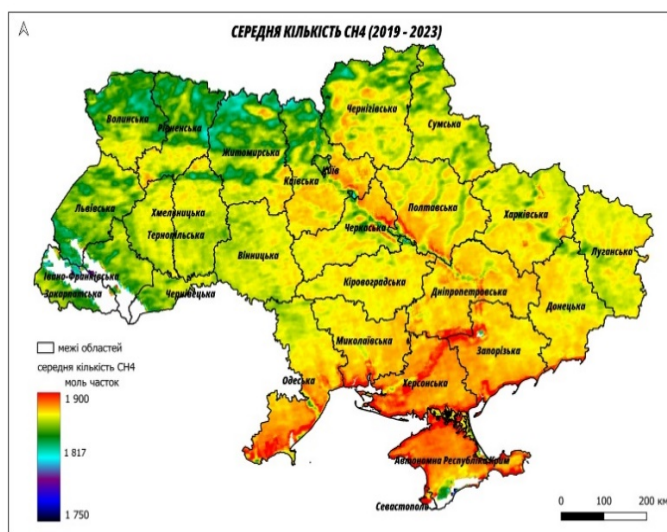


Рис. 2. Середні концентрації метану за період з 2019 до 2023 року.

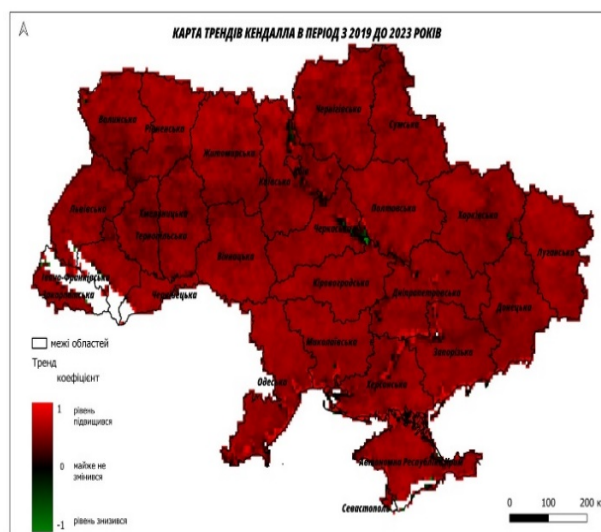


Рис. 3. Карта трендів Кендалла за період 2019-2023 років.

Відсутність пікселів в гірських регіонах пов'язана із відносно малою кількістю даного забруднювача в горах, складним рельєфом, присутністю хмарності, низькою просторовою роздільною здатністю (для метану у TROPOMI розмір пікселя становить 7×7 км). Так як використовувалися вже оброблені, відфільтровані дані (для всіх колекцій обрано рівень обробки L3), то вони над гірською місцевості або відсутні, або їх було вилючено програмою як ненадійні.

Середньомісячні концентрації CH₄

mol fraction

methane

Month	Year	Mol fraction (approx.)
M	2020	1,858
A	2020	1,834
M	2020	1,847
M	2020	1,847
J	2020	1,838
J	2020	1,842
S	2020	1,850
S	2020	1,861
N	2020	1,853
N	2020	1,853
M	2021	1,861
M	2021	1,858
M	2021	1,861
M	2021	1,853
M	2021	1,855
M	2021	1,856
J	2021	1,866
J	2021	1,856
J	2021	1,858
S	2021	1,867
S	2021	1,878
N	2021	1,867
N	2021	1,888
M	2022	1,884
M	2022	1,859
M	2022	1,861
M	2022	1,862
M	2022	1,880
M	2022	1,886
M	2022	1,887
M	2022	1,881
M	2022	1,880
M	2022	1,866
M	2022	1,871
M	2022	1,871
J	2022	1,872
J	2022	1,896
S	2022	1,888
S	2022	1,891
N	2022	1,885
N	2022	1,903
M	2023	1,887
M	2023	1,896
M	2023	1,871
M	2023	1,875
M	2023	1,876
M	2023	1,884
M	2023	1,884
M	2023	1,881
M	2023	1,889
M	2023	1,898
M	2023	1,896
M	2023	1,914
M	2023	1,915

За побудованим графіком середньомісячних концентрацій (рис.4) спостерігаємо сезонність зміни кількості даного забруднювача в атмосфері. Причинами цих змін є температурні умови і природний викид метану від діяльності бактерій влітку-восени (гниття сміттєзвалищах, цвітіння водойм). В період 2019–2022 років графік демонструє відносно стабільний постійний ріст викидів, спричинений діяльністю аграрного сектора, газотранспортної системи, звалищ, шахт, а взимку, коли припиняється діяльність бактерій, додається використання викопних вуглеводнів як палива.

У період повномасштабного військового вторгнення 2022–2023 роки [18] відбувалося руйнування аграрного сектору (масова загибель тварин на фермах), промислових об'єктів, газової інфраструктури, що призвело до локального підняття викидів метану. Помітна різниця між груднем 2022 року і січнем 2023 – більш різке падіння рівня метану на початку 2023 року.

Дослідження забруднення діоксидом азоту (NO_2). Газ NO_2 є потужним окислювачем, дуже шкідливий для здоров'я, особливо дихальної системи, навіть низькі концентрації викликають набряк легень, він виявляє канцерогенну, імуно- та генотоксичну дію [16]. Цей газ важчий за повітря, викинутий з труб заводів, він осідає до землі. Має різкий специфічний запах.

Діоксид азоту забруднює атмосферу головним чином в результаті людської діяльності: при спалюванні викопного палива, в двигунах

внутрішнього згоряння, при виробленні електроенергії, сталеварних та металообробних підприємств, на підприємствах деревообробної, харчової промисловості, під час виробництва азотних добрив та пожеж на торфовищах.

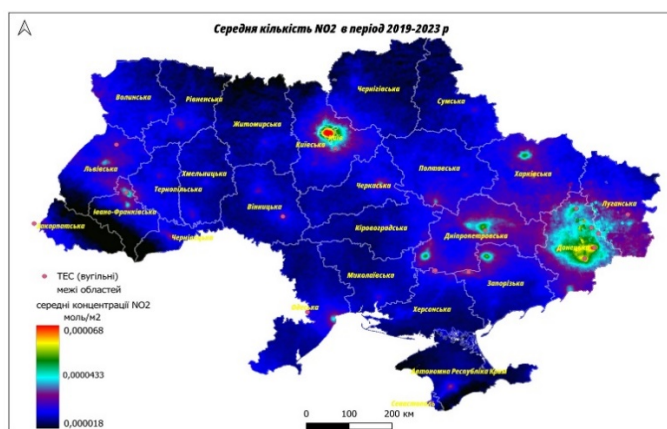


Рис. 5. Тематична карта середньої кількості діоксиду азоту за період 2019-2023 роки.

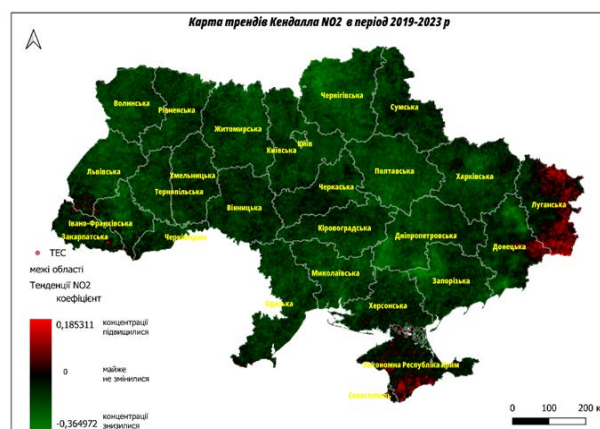


Рис. 6. Карта трендів Кендалла діоксиду азоту за період 2019-2023 роки.

За створеною картою середніх концентрацій діоксиду азоту (рис.5) помітно, що найбільш забрудненими є міські агломерації: Київська, Черкаська, Дніпропетровська, Криворізька, Запорізька, Харківська, Львівська, Івано-Франківська, Бахмут, Соледар, Одеса та тимчасово окупована (т.о.) Донецько-Майорська та прилегли агломерації, т.о. Маріуполь та ін.

Місця розташування теплових електростанцій (ТЕС), що працюють на вугіллі, також є осередками високої концентрації NO_2 , найбільшими з них є Бурштинська ТЕС, Зміївська ТЕС, Курахівська ТЕС, Придніпровська ТЕС.

За картою трендів Кендалла (рис.6) спостерігається падіння рівня NO_2 майже по всій території нашої держави, крім Карпатського регіону, східної частини т.о. Луганської, Донецької та південної т.о. частини Херсонської областей і Криму. Причиною є вплив військових дій, руйнування та скорочення виробництва, релокація підприємств та переміщення населення в західні регіони.



Рис. 7. Графік середньомісячних концентрацій діоксиду азоту за п'ять років.

Графік концентрацій діоксиду азоту (рис.7) демонструє яскраво виражену сезонність змін: зимове підвищення спричинене спалюванням викопного палива, збільшенням кількості автомобільного транспорту та температурними інверсіями. Влітку на сонці відбувається фотохімічні реакції розпаду NO_2 , краще змішування повітря, тому концентрації його знижені. Осіннє та весняне підвищення зумовлене спалюванням опалого листя, городини та стерні.

Під час пандемії COVID-19 відмічено зниження концентрацій діоксиду азоту у період локдауну та зростання концентрацій після проведення масової вакцинації та послаблення умов карантину [19] з піком в грудні 2021 року.

Вплив військових дій спричинив падіння рівня забруднювача та динаміку сезонних коливань кількості. Відмічено його зменшення протягом 2022-2023 років. Після масованих ракетних обстрілів [18] 15 листопада та 23 листопада 2022 року (цей обстріл спричинив зупинку усіх чотирьох діючих атомних електростанцій (АЕС)) та 10 лютого 2023 року (зупинку Хмельницької АЕС), спостерігалися різкі зниження концентрацій NO_2 . Зупинка та руйнування підприємств особливо металургійних гігантів сприяло зниженню загального рівня забруднювача.

Дослідження забруднення монооксидом вуглецю (CO). Це дуже отруйний газ без кольору, не має запаху та смаку, більш відомий як чадний газ. Підвищені концентрації CO у повітрі спричиняють токсичний ефект на мозок, серце, розвиток плоду вагітної жінки, посилюють дію інших забруднювачів атмосфери і збільшують ризик розвитку респіраторних захворювань.

Даний газ утворюється як результат неповного згоряння вуглеводнів (бензину, вугілля, торфу), спалюванні опалого листя, викидів з підприємств коксохімічної та металургійної промисловості, а також як результат окиснення метану (CH_4) та інших вуглеводнів.

Концентрації газу залежать від рельєфу. Він накопичується в низинах і обдувається вітрами з височин. Найнижчі середньомісячні концентрації CO спостерігаються над висотами, а в Україні – це Карпати та Кримські гори. Найвищі концентрації відмічені у Дніпровській, Закарпатській та Чорноморсько-Азовський низовинах. Помітний відчутний вплив людської діяльності на концентрацію газу в низинах, особливо в промислових центрах-виробниках сталі, таких як Запоріжжя, Дніпро, Кривий Ріг, т.о. Нікополь, Марганець, Маріуполь, Бердянськ, Мелітополь. Велика концентрація чадного газу спостерігається в Києві, Кременчуці, Черкасах, Херсоні, навколо електростанцій (Чорнобильська АЕС, Запорізька АЕС), а також Закарпатській області, де має місце транскордонне забруднення монооксидом вуглецю. Розташування ТЕС впливає на підвищення концентрацій CO за умови, якщо вони розташовані на низині, наприклад, Придніпровська ТЕС, Зміївська ТЕС.

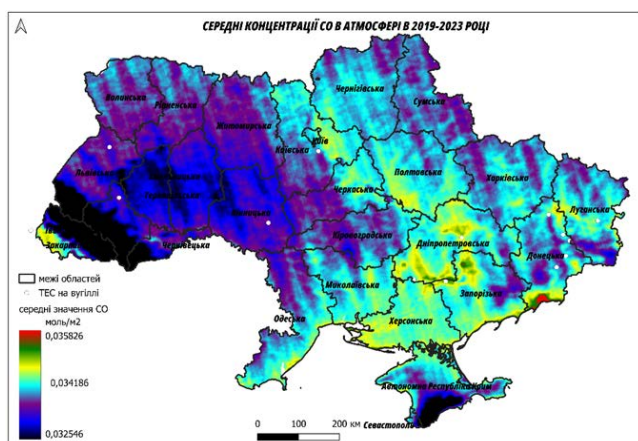


Рис. 8. Тематична карта середніх концентрацій CO за період 2019-2023 років.



Рис. 9. Карта трендів Кендалла для чадного газу за період 2019-2023 років.

За створеною картою трендів Кендалла для CO (рис. 9) бачимо загальне зниження концентрацій монооксиду вуглецю на всій території України, особливо на східній її частині, яка найбільше потерпає від російської агресії. Зниження кількості чадного газу відбулося в Києві, Запоріжжі, Кривому Розі, Дніпрі, т.о. Маріуполі. Осередки збільшення концентрацій спостерігаються у Львівській, Рівненській, Житомирській, Черкаській та Кіровоградській областях, що може бути результатом релокації підприємств та концентрації промислових потужностей на територіях, які зазнають меншого військового впливу.



Рис. 10. Графік середньомісячних концентрацій чадного газу за період 2019-2023 роки.

З даного графіку середньомісячних концентрацій CO (рис.10) помітна сезонність змін кількості газу в атмосфері, зниження концентрацій з травня до жовтня з невеликим підвищенням в серпні-вересні, коли відбувається спалювання листя та городини, зростання з жовтня до квітня, що відповідає опалювальному сезону.

Карантинний період спричинивши значний спад концентрації СО над Україною з мінімумом в липні 2020 року, а зростання відбувалося після послаблення умов карантину та початку проведення масової вакцинації.

Військові дії також спричинили падіння загальної кількості СО, графік змінив свою форму, так як зупинилися або скоротилися основні джерела викидів: руйнування Азовсталі, Кременчуцького НПЗ, Авдіївського коксохіму, Одеського НПЗ та ін.

Дослідження забруднення діоксидом сірки (SO_2). Це безбарвний газ з різким специфічним запахом, при взаємодії з водою утворює сірчану кислоту. Подразнює слизові оболонки носа, очей, горла та викликає загострення захворювань астми чи бронхіту. Тривале вдихання завдає непоправної шкоди легеням. Має генотоксичний вплив. Випадаючи кислотним дощем, призводить до опіків листя та закислює середовище, що призводить до хвороб та втрати видової різноманітності дикої природи.

Джерела забруднення в Україні: лісові пожежі, гниття органіки, спалювання викопного палива, хімічна та металургійна промисловість. В повітрі зберігається недовго, максимум два тижні, активно взаємодіє із вологою.

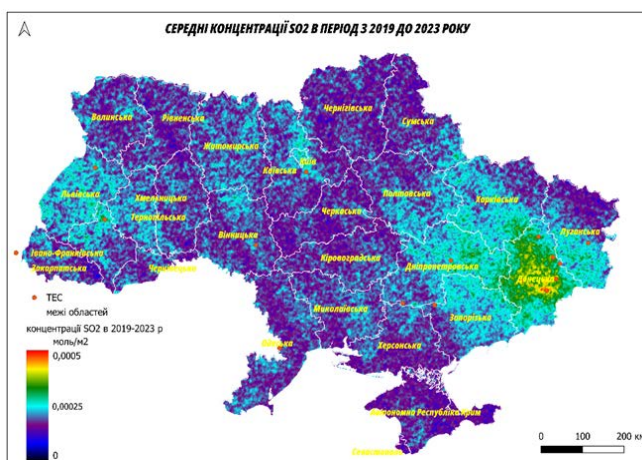


Рис. 11. Тематична карта середніх концентрацій SO_2 за період 2019-2023 роки.

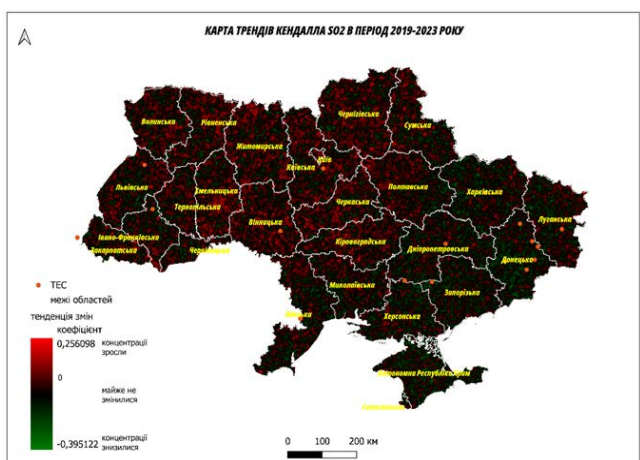


Рис. 12. Карта трендів Кендалла діоксиду сірки за період 2019-2023 роки.

Створено карту середніх концентрацій діоксиду сірки (рис.11), яка демонструє місця перевищень в південно-східній частині України, місця скупчення металургійної промисловості, особливо на т.о. Донецькій агломерації. Найбільші середні концентрації у Львівській, Хмельницькій, Житомирській, Київській, Полтавській, Дніпропетровській, Запорізькій, Харківській областях, містах Черкаси та Кременчук, на півдні Сумської області та ін. Місця розташування ТЕС також є осередками перевищень діоксиду сірки на території України.

По карті трендів (рис. 12) досліджено, що східна та південна частина України має тенденції до зниження концентрацій, оскільки найбільше потерпає від військових дій, там скоротилася економічна активність, змінилося використання енергії та палива. Центральна та західна частини мають тенденції до росту концентрацій SO_2 .

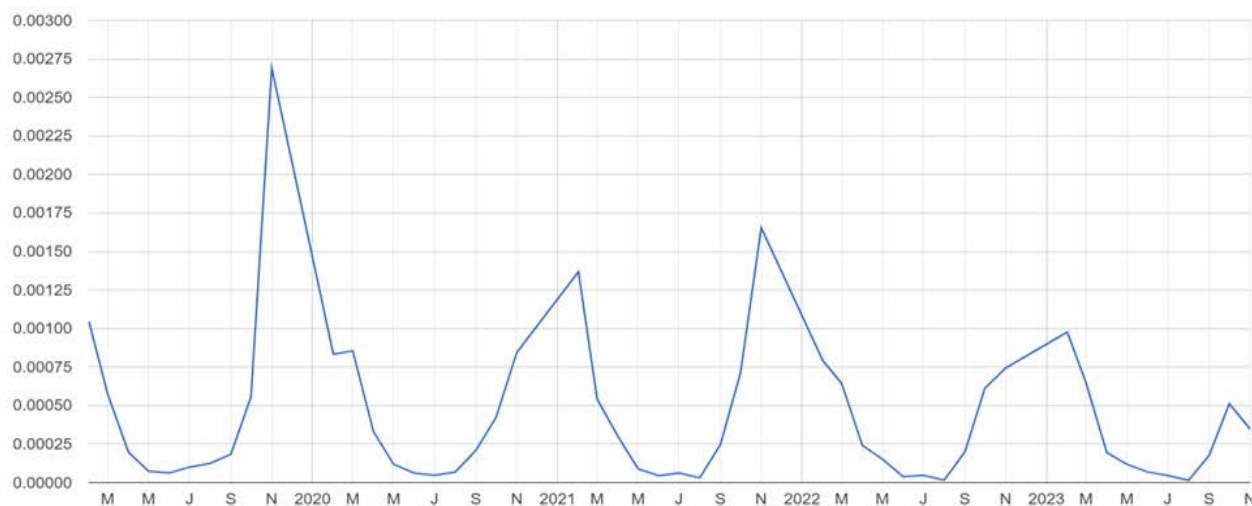


Рис. 13. Графік середньомісячних концентрацій діоксиду сірки за період 2019-2023 роки.

Графік середньомісячних концентрацій діоксиду сірки (рис. 13) теж демонструє сезонність змін: підвищення концентрацій в холодний період та зниження в теплий. Це зумовлене більшим споживанням енергії та палива в холодний період, також погіршене перемішування повітря в зимові місяці, сприяє довшому зберіганню газу в приземній атмосфері, а влітку за високих температур цей газ швидше розсіюється.

Під час карантину концентрації діоксиду сірки стали нижчі, хоча загальні тенденції росту і падіння збереглися. Масовані обстріли промисловості та енергетичної галузі суттєво вплинули на кількість газу. Помічено зниження рівня середніх показників забруднювача.

Порівняння з нормами ГДК. У дослідженні було здійснено порівняння показників супутникових даних із показниками гранично допустимих концентрацій (ГДК) забруднюючих речовин, що діють в Україні. Для цього виконано перерахунок ГДК для досліджуваних речовин CO , NO_2 , SO_2 , з одиниць масової концентрації (мкг/м^3 або мг/м^3) у одиниці колонкової концентрації (моль/м^2), оскільки ГДК визначається у вигляді концентрацій в мг/м^3 або мкг/м^3 , тоді як супутникові дані надаються у вигляді колонкової кількості молекул моль/м^2 [17]. Отримані після перерахунку дані, значно перевищують середні концентрації забруднювачів в атмосфері України. Для CH_4 було перерахування з одиниць кількості часток в сухому повітрі, отримані із супутника, в одиниці колонкової кількості. Результати виявилися

неправдоподібними, оскільки мінімальна отримана кількість з даних Sentinel 5P майже в два рази перевищувала перераховану норму ГДК.

Оскільки питання перетворень одиниць вимірювання все ще є предметом дискусій науковців і результати не було порівняно та верифіковано з показниками наземних станцій, ми не можемо стверджувати, що вони правильні. Тому дане порівняння запропоноване як приклад порівняння концентрацій, якщо ГДК будуть надані нормативними актами в одиницях колонкової кількості.

Оцінка можливості використання дистанційного моніторингу в державних програмах охорони довкілля. Аналіз змін навколишнього середовища за допомогою GEE може зайняти важливе місце у реалізації Україною природоохоронних програм [21, 22], наприклад, Європейської програми «Чисте повітря для Європи» (Clean Air for Europe, CAFE). Вона передбачає поступове зниження рівня забруднення повітря з метою захисту як здоров'я людей, так і довкілля. Використання супутникових даних за допомогою платформи Google Earth Engine дає можливість проводити моніторинг певних видів забруднювачів повітря, виконувати оцінку вже впроваджених заходів щодо їх ефективності для покращення якості повітря, можливість інтеграції даних супутників та наземних станцій моніторингу, тощо.

Висновки та рекомендації подальшого дослідження. GEE є потужною платформою для аналізу супутникових даних і екологічного моніторингу забруднення атмосфери. Проведене дослідження показало дієвість її використання разом з супутниковими даними від Sentinel 5P. За отриманими результатами можна виконувати аналіз кількості та визначати місця концентрації небезпечних газів у атмосфері над територією нашої країни, навіть над тимчасово окупованими територіями, помітні загальні тенденції до збільшення та зниження кількості певних речовин у повітрі і вплив на це подій останніх років. Також виявлено обмеження у супутникових даних, що використовувалися у роботі, наприклад, низька просторова роздільна здатність, частота спостережень один раз на день, деякі дані наявні лише через місяць після проведення зйомки, тощо. Для розуміння правильності отриманих результатів необхідно проводити валідацію супутникових даних та контролю за допомогою наземних вимірювань.

Список використаної літератури:

1. Kumar Lalit. Google Earth Engine Applications Since Inception: Usage, Trends, and Potential / Kumar Lalit, Mutanga Onesimo // Remote Sens. – 2018. - № 10 (10) - 1509. <https://doi.org/10.3390/rs10101509>.

2. Давибіда Л.І. Аналіз можливостей і досвіду використання платформи Google Earth Engine для вирішення задач моніторингу довкілля / Л.І. Давибіда // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. - 2022. - Том 12. - №2. – С. 75 – 86. DOI: 10.31471/2415-3184-2021-2(24)-75-86.
3. Давибіда Л.І. Можливості використання даних дистанційного зондування землі для дослідження впливу нафтогазового комплексу на стан довкілля (на прикладі Карпатського регіону) / Л.І. Давибіда., Б.В. Карпінський // Науково-практичний журнал. Екологічні науки. - 2024. - Том 1. № 1(52) – С. 36-41. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.5>.
4. Davybida L. (2023). Air quality impacts of war detected from the Sentinel-5P satellite over Ukraine. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1254. 012112. DOI: 10.1088/1755-1315/1254/1/012112.
5. Application of Information and Communication Technologies in Environmental Scientific Research (on Example of Sulfur Dioxide Emissions Research into the Atmospheric Air of Ukraine) / Yelistratova, L., Apostolov, A., Khodorovskiy, A., Tymchyshyn, M., In: Faure, E. [et al.] // Information Technology for Education, Science, and Technics. ITEST. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. Springer, Cham. – 2024. – vol 221. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4_26.
6. Моніторинг якості атмосферного повітря над територією України з деталізацією для міст за даними супутника Sentinel-5P. / М.В. Савенець, В.І. Осадчий, А.В. Орещенко // Вісник НАН України. – 2021. – №3. – С. 50–58. <https://doi.org/10.15407/vissn2021.03.050>.
7. Мотрунич М. Управління якістю атмосферного повітря в країнах Європи / М. Мотрунич за ред. Ратушної М., Амосова М, Криницького – Київ: Центр екологічних ініціатив «Екодія», 2022. – 40 с.
8. Забруднення повітря в Україні – погляд з космосу / Skalsky Martin, Soroka Maksym, Labohy Jan [et al.] // Arnika – Citizens Support Centre. – November, 2020. DOI: 10.13140/RG.2.2.21053.28645
9. Супутниковий моніторинг вмісту метану в атмосфері на території України / М.А. Тимчишин, Л.А. Єлістратова, А.А. Апостолов, А.Я. Ходоровського [та ін.] // European Association of Geoscientists & Engineers. 17-та Міжнародна конференція Моніторинг геологічних процесів та екологічного стану навколишнього середовища. – 2023. – том 2023 р. – С.1 – 5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520033>.
10. Air pollution declines during COVID-19 lockdowns mitigate the global health burden / Zander S. Venter, Kristin Aunan, Sourangsu Chowdhury, Jos Lelieveld // Environmental Research. – 2021. – Volume 192. – 110403, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110403>.
11. Changes in air pollution, land surface temperature, and urban heat islands during the COVID-19 lockdown in three Chinese urban agglomerations / Zihao Feng, Xuhong Wang, Jiaxin Yuan, Ying Zhang, Mengqianxi Yu // Science of The Total Environment. – 2023. – Volume 892, 20 - 164496 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164496>.

12. Md. Nazmul Haque, Md. Shahriar Sharif, Rhyme Rubayet Rudra, Mahdi Mansur Mahi, Md. Jahir Uddin, Radwan G. Abd Ellah, Analyzing the spatio-temporal directions of air pollutants for the initial wave of Covid-19 epidemic over Bangladesh: Application of satellite imageries and Google Earth Engine, Remote Sensing Applications: Society and Environment. – 2022. – Volume 28. – 100862, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100862>.
13. Shami Siavash, Ranjgar Babak, Bian Jinhua, Khoshlahjeh Azar Mahdi, Moghimi Armin, Amani Meisam, Naboureh Amin. (2022). Trends of CO and NO2 Pollutants in Iran during COVID-19 Pandemic Using Timeseries Sentinel-5 Images in Google Earth Engine. Pollutants 2022, 2(2), 156-171. DOI: 10.3390/pollutants2020012.
14. Air pollution dispersion in Hail city: Climate and urban topography impact / Walid Hassen, Nidhal Hnaïen, Lotfi Ben Said [et. al] // Heliyon. – 2023. – Volume 9. – Issue 10, e20608, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20608>.
15. Harris Lorenzaj, Adewale, Tunmise. (2024). Industrial Emissions and Air Quality: Examining Trends and the Struggle for Effective Regulation. URL: https://www.researchgate.net/publication/385378277_Industrial_Emissions_And_Air_QualityExamining_Trends_and_the_Struggle_for_Effective_Regulation.
16. World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. <https://iris.who.int/handle/10665/345329>.
17. Shallcross, Dudley. (2011). Atmospheric chemistry by Ann Holloway and Richard Wayne. RSC Publishing, 2010. ISBN: 978-1-84755-807-7. 260 pp. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society – QUART J ROY METEOROL SOC. 137. 1102-1102. DOI:10.1002/qj.726.
18. Удари по об'єктах критичної інфраструктури України під час російсько-української війни. URL: <https://uk.wikipedia.org/>.
19. Про запобігання поширенню на території України гострої респіраторної хвороби COVID-19, спричиненої коронавірусом SARS-CoV: Постанова Кабінету Міністрів України від 11 березня 2020 р. № 211. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/211-2020-%D0%BF#Text>.
20. In: Neil Salkind (Ed.) The Kendall Rank Correlation Coefficient / Encyclopedia of Measurement and Statistics. – 2007. – URL: <https://personal.utdallas.edu/~herve/Abdi-KendallCorrelation2007-pretty.pdf>.
21. Угода про асоціацію між Україною, з однієї сторони, та Європейським Союзом, Європейським співтовариством з атомної енергії і їхніми державами-членами, з іншої [...]: від 27.06.2014 № 984_011. – URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text.
22. Директива 2008/50/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 21 травня 2008 року про якість атмосферного повітря та чистіше повітря для Європи: від 21.05.2008 № 994_950. – URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_950#Text.

Pliushch Tetiana, Linichenko Tetiana,
Kyiv National University of Construction and Architecture

RESEARCH OF THE CONDITION OF THE ENVIRONMENT USING GOOGLE EARTH ENGINE

The possibility of conducting a study of atmospheric pollution in Ukraine with nitrogen dioxide, sulfur dioxide, carbon monoxide, and methane using data collected by Sentinel 5P satellite with the TROPOMI tool and the Google Earth Engine platform in the period from 2019 to 2023 years was considered. Developed a methodology for analyzing air quality for quick research of the dynamics of changes in pollutant concentrations based on satellite data. Thematic maps of the amount of pollutants across the territory of Ukraine, Kendall trend maps, and graphs of average gas concentrations by month for the selected period of 5 years were constructed. The results obtained for each of the studied gases were analyzed, revealed the regularity of seasonal changes and the impact of events of recent years, covering the quarantine period due to the COVID-19 pandemic and the beginning of a full-scale invasion of Russia. An assessment of the possibility of using remote monitoring in state environmental protection programs, for example, the European Clean Air for Europe (CAFE) program, was conducted. An attempt was made to compare the amount of the studied gases recorded by the satellite with the maximum permissible standards of Ukraine, but the results turned out to be implausible due to different units of measurement, the complexity of the conversion, and the need to involve a large amount of additional data.

Key words: remote sensing; Google Earth Engine; Sentinel-5P; Copernicus; air pollution; monitoring; nitrogen dioxide; sulfur dioxide; carbon monoxide; methane.

REFERENCES

1. Kumar Lalit. Google Earth Engine Applications Since Inception: Usage, Trends, and Potential / Kumar Lalit, Mutanga Onesimo // Remote Sens. – 2018. - № 10 (10) - 1509. <https://doi.org/10.3390/rs10101509>. {in English}
2. Davybida L. Analysis of capabilities and experience of using Google Earth Engine platform for enviromental monitoring challenges / Davybida L. // Ecological Safety and Balanced Use of Resources. - 2022. - Том 12. - №2. – P. 75 – 86. DOI: 10.31471/2415-3184-2021-2(24)-75-86. {in Ukrainian}
3. Davybida L. 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., Karpinskyi B. // Ecological Sciences 1(1 (52)):36-41. - 2024. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.5>. {in Ukrainian}

4. Davybida L. Air quality impacts of war detected from the Sentinel-5P satellite over Ukraine. // 2023 IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 1254. 012112. DOI: 10.1088/1755-1315/1254/1/012112. {in English}
5. Application of Information and Communication Technologies in Environmental Scientific Research (on Example of Sulfur Dioxide Emissions Research into the Atmospheric Air of Ukraine) / Yelistratova, L., Apostolov, A., Khodorovskiy, A., Tymchyshyn, M., In: Faure, E. [et al.] // Information Technology for Education, Science, and Technics. ITEST. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies. Springer, Cham. – 2024. – vol 221. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4_26. {in English}
6. Savenets M, Osadchyi V, Oreshchenko A. Atmospheric air quality monitoring over the territory of Ukraine with specification over the cities using SENTINEL-5P satellite data // Visnik Nacional Noi Akademii Nauk Ukraini, (3), 50–58. – 2021. <https://doi.org/10.15407/visn2021.03.050>. {in Ukrainian}
7. Motrunych M. Managing air quality in Europe/ M. Motrunych Edited by Ratushna M., Amosov M., Krynytsky – Kyiv: Center for Environmental Initiatives “Ecodia”, 2022. – 40 p. {in Ukrainian}
8. Air pollution in Ukraine – a view from space / Skalsky M., Soroka M., Labohy Jan [et al.] // Arnika – Citizens Support Centre. – November, 2020. DOI: 10.13140/RG.2.2.21053.28645. {in Ukrainian}
9. Satellite Monitoring of Methane Content in the Atmosphere on the Territory of Ukraine / M.A. Tymchyshyn, L.A. Yelistratova, A.A. Apostolov, A.Ya. Khodorovskiy and I.V. Zakharchuk // 17th International Conference Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment, Nov 2023, Vol. 2023, p.1 – 5/ DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2023520033>. {in Ukrainian}
10. Air pollution declines during COVID-19 lockdowns mitigate the global health burden / Zander S. Venter, Kristin Aunan, Sourangsu Chowdhury, Jos Lelieveld // Environmental Research. – 2021. – Volume 192. – 110403, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110403>. {in English}
11. Changes in air pollution, land surface temperature, and urban heat islands during the COVID-19 lockdown in three Chinese urban agglomerations / Zihao Feng, Xuhong Wang, Jiaxin Yuan, Ying Zhang, Mengqianxi Yu // Science of The Total Environment. – 2023. – Volume 892, 20 - 164496 <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164496>. {in English}
12. Md. Nazmul Haque, Md. Shahriar Sharif, Rhyme Rubayet Rudra, Mahdi Mansur Mahi, Md. Jahir Uddin, Radwan G. Abd Ellah, Analyzing the spatio-temporal directions of air pollutants for the initial wave of Covid-19 epidemic over Bangladesh: Application of satellite imageries and Google Earth Engine, Remote

Sensing Applications: Society and Environment. – 2022. – Volume 28. – 100862, ISSN 2352-9385, <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2022.100862>. {in English}

13. Shami Siavash, Ranjgar Babak, Bian Jinhu, Khoshlahjeh Azar Mahdi, Moghimi Armin, Amani Meisam, Naboureh Amin. (2022). Trends of CO and NO₂ Pollutants in Iran during COVID-19 Pandemic Using Timeseries Sentinel-5 Images in Google Earth Engine. Pollutants 2022, 2(2), 156-171. DOI: 10.3390/pollutants2020012. {in English}

14. Air pollution dispersion in Hail city: Climate and urban topography impact / Walid Hassen, Nidhal Hnaïen, Lotfi Ben Said [et. al] // Heliyon. – 2023. – Volume 9. – Issue 10, e20608, ISSN 2405-8440, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e20608>. {in English}

15. Harris Lorenzaj, Adewale, Tunmise. (2024). Industrial Emissions and Air Quality: Examining Trends and the Struggle for Effective Regulation. URL: https://www.researchgate.net/publication/385378277_Industrial_Emissions_And_Air_QualityExamining_Trends_and_the_Struggle_for_Effective_Regulation. {in English}

16. World Health Organization. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization. <https://iris.who.int/handle/10665/345329>. {in English}

17. Shallcross, Dudley. (2011). Atmospheric chemistry by Ann Holloway and Richard Wayne. RSC Publishing, 2010. ISBN: 978-1-84755-807-7. 260 pp. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society – QUART J ROY METEOROL SOC. 137. 1102-1102. DOI:10.1002/qj.726. {in English}

18. Russian strikes against Ukrainian infrastructure (2022–present). URL: <https://uk.wikipedia.org/>. {in Ukrainian}

19. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated March 11, 2020 No. 211. – URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/211-2020-%D0%BF#Text>. {in Ukrainian}

20. In: Neil Salkind (Ed.) The Kendall Rank Correlation Coefficient / Encyclopedia of Measurement and Statistics. – 2007. – URL: <https://personal.utdallas.edu/~herve/Abdi-KendallCorrelation2007-pretty.pdf>. {in English}

21. The European Union–Ukraine Association Agreement from 27.06.2014 № 984_011. – URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/984_011#Text. {in Ukrainian}

22. Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe. № 994_950. – URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/994_950#Text. {in Ukrainian}