

ГАЛАКТИОНОВ МИКОЛА

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

<https://orcid.org/0009-0006-7949-5713>E-mail: [nikolay@galaktionov.com](mailto:nikolay@galaktionov.com)

БРЕДУН ВІКТОР

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

<https://orcid.org/0000-0002-8214-3878>

## ІНТЕГРАЦІЯ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МОНІТОРИНГУ ТРАНСПОРТНОГО ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ

*Забруднення повітря у містах, спричинене викидами автотранспорту, стає дедалі більшою проблемою, особливо це стосується промислово навантажених міст, таких як Кривий Ріг. Постійний інтенсивний трафік руху та експлуатація транспортних засобів, що не відповідають сучасним екологічним стандартам, суттєво впливають на якість атмосферного повітря. Традиційні методи контролю забруднення часто є недостатніми для своєчасного реагування на постійні зміни якості повітря, що призводить до запровадження обмежень лише після досягнення критичних рівнів забруднення. Такий підхід є малоєфективним для довгострокового управління якістю повітря. У статті розглядається важливість впровадження систем прогнозування як невід'ємної складової екологічного моніторингу. Системи прогнозування дозволяють заздалегідь оцінювати зміни якості атмосферного повітря та вчасно вживати заходи для мінімізації шкідливого впливу автотранспорту. Особливо важливими є такі системи в зонах з інтенсивним рухом, де накопичення забруднювачів може швидко перевищити безпечні рівні. Впровадження таких технологій дозволить містам ефективніше управляти транспортними потоками, знижуючи інтенсивність руху в періоди, коли ризик забруднення є найвищим. Це дослідження зосереджене на розробці підходів для інтеграції моделей прогнозування з системами моніторингу в реальному часі. Така інтеграція дозволяє отримати точнішу картину про вплив транспорту на повітряне середовище та своєчасно реагувати на потенційні екологічні загрози. Окрім того, результати показують, що управління транспортними потоками на основі прогнозних моделей може значно зменшити кількість викидів, особливо в зонах найбільшого навантаження, таких як транспортні вузли та магістралі. Впровадження таких систем забезпечує можливість планування міських транспортних мереж із врахуванням екологічних факторів, що в свою чергу підвищує комфорт життя мешканців і зменшує негативний вплив на навколишнє середовище.*

**Ключові слова:** забруднення повітря, системи прогнозування, викиди автотранспорту, моніторинг, екологічний вплив, міський трафік

HALAKTIONOV MYKOLA

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»

BREDUN VIKTOR

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»

## INTEGRATION OF FORECAST MODELS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF TRANSPORT ENVIRONMENTAL IMPACT MONITORING

*Urban air pollution caused by vehicle emissions is becoming a growing problem, especially in industrially loaded cities such as Kryvyi Rih. Constant heavy traffic and the operation of vehicles that do not meet modern environmental standards significantly affect the quality of atmospheric air. Traditional methods of pollution control are often insufficient to respond in a timely manner to continuous changes in air quality, resulting in the introduction of restrictions only after critical levels of pollution have been reached. This approach is ineffective for long-term air quality management. The article considers the importance of implementing forecasting systems as an integral component of environmental monitoring. Forecasting systems make it possible to assess changes in atmospheric air quality in advance and to take measures in time to minimize the harmful effects of motor vehicles. Such systems are especially important in high-traffic areas where the accumulation of pollutants can quickly exceed safe levels. The implementation of such technologies will allow cities to manage traffic flows more effectively, reducing the intensity of traffic during periods when the risk of pollution is the highest. This research focuses on developing approaches for integrating forecasting models with real-time monitoring systems. Such integration allows for a more accurate picture of the impact of transport on the air environment and timely response to potential environmental threats. In addition, the results show that the management of traffic flows based on predictive models can significantly reduce emissions, especially in areas of the highest load, such as transport hubs and highways. The implementation of such systems provides the possibility of planning urban transport networks taking into account environmental factors, which in turn increases the comfort of life of residents and reduces the negative impact on the environment.*

**Keywords:** air pollution, forecasting systems, vehicle emissions, monitoring, environmental impact, urban traffic.

### Постановка проблеми

Зростання кількості автомобілів у міських умовах призводить до значного збільшення забруднення повітря, особливо у промислових регіонах, таких як місто Кривий Ріг. Викиди автомобілів здійснюють значну кількість шкідливих речовин, основними забруднювачами серед яких являються діоксид азоту (NO<sub>2</sub>), оксид вуглецю (CO), тверді частки та вуглеводні, що не лише погіршують якість повітря, а й становлять серйозну загрозу здоров'ю мешканців міста.

На даний момент багато міст використовують запобіжні методи управління забрудненням, запроваджуючи обмеження лише після того, як рівень забруднення перевищує допустимі норми. Проте цей підхід часто є недостатньо ефективним для довгострокового зменшення екологічних наслідків. Необхідність у прогнозних системах, що дозволяють передбачати рівні забруднення на основі даних про рух транспорту, погодні умови та міську інфраструктуру, стає все більш очевидною. Впровадження таких систем у мережі

моніторингу дозволить перейти до стратегій, що сприятимуть покращенню управління якістю повітря та зменшенню шкідливого впливу автотранспорту на атмосферу.

### Аналіз джерел досліджень та публікацій

Багато міжнародних досліджень акцентують увагу на ролі систем прогнозування в екологічному моніторингу. У Європі та США активно використовуються передові моделі прогнозування, інтегровані з системами моніторингу якості повітря для передбачення поширення забруднюючих речовин та прийняття рішень щодо охорони здоров'я населення. Дослідження, проведені Європейським агентством з охорони навколишнього середовища (EEA) [1], демонструють ефективність використання моделей, таких як COPERT (Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport) [2], для прогнозування викидів автотранспорту. Подібним чином Агентство з охорони навколишнього середовища США (EPA) використовує модель MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator) [3], для моделювання викидів автотранспорту та прогнозування їх впливу на якість повітря.

В Україні впровадження систем прогнозування для екологічного моніторингу знаходиться на стадії розвитку. Незважаючи на значний прогрес у розвитку технологій моніторингу, моделі прогнозування, що враховують місцеві кліматичні умови, трафік і промислову активність, ще не повністю інтегровані в систему [4]. Це дослідження ґрунтується на використанні технологій, розроблених у країнах, які вже активно впроваджують сучасні екологічні рішення для моніторингу та управління якістю повітря, і застосовує їх до специфіки Кривого Рогу – міста з унікальними екологічними викликами через поєднання індустріальної активності та щільного трафіку.

**Невирішені аспекти проблеми.** Незважаючи на наявність різних методологій для моніторингу та прогнозування забруднення повітря, залишається низка невирішених проблем. Основна з них – відсутність реальної інтеграції між даними про рух транспорту та моніторингом якості повітря в містах із великими промисловими підприємствами та транспортними мережами, таких як Кривий Ріг. Крім того, багато моделей прогнозування не враховують локальні фактори, такі як топографія, промислові зони та специфічні погодні умови, що впливають на розповсюдження забруднювальних речовин. Це призводить до розбіжностей між прогнозованими та фактичними рівнями забруднення, що знижує ефективність управління якістю повітря.

Іншою невирішеною проблемою є відсутність даних багаторічних моніторингових спостережень за станом атмосферного повітря для конкретних міських зон, що обмежує можливість створення точних моделей прогнозування. У містах з різноманітними джерелами забруднення, системи прогнозування мають бути адаптивними до змін інфраструктури, інтенсивності руху транспорту та міського розвитку.

**Постановка завдання.** Метою цього дослідження є створення системи для інтеграції прогнозних моделей у інфраструктуру екологічного моніторингу міста Кривий Ріг. Пропонована система об'єднує дані реального часу про транспортні потоки, метеорологічну інформацію та моделі викидів автотранспорту для прогнозування змін якості повітря. Дана система передбачає:

- Аналіз поточного стану забруднення повітря у ключових транспортних зонах Кривого Рогу на основі існуючих даних моніторингу.
- Розробку моделей прогнозування, які можуть передбачати вплив викидів автотранспорту на якість повітря в реальному часі.
- Оцінку ефективності управління транспортними потоками на основі прогнозних даних.
- Пропозиції щодо покращення існуючих систем моніторингу для забезпечення кращої інтеграції з інструментами прогнозування.

### Виклад основного матеріалу

Ефективна система моніторингу якості повітря є важливою складовою для оцінки рівня забруднення в містах з інтенсивним рухом автотранспорту. Місто Кривий Ріг, з його розвиненою транспортною інфраструктурою та щільними транспортними потоками, особливо потерпає від високих рівнів забруднення на основних транспортних вузлах, таких як перехрестя 95-го кварталу, перехрестя проспекту Металургів і вул. Нікопольське шосе, вулиця Вільної Ічкерії та інші центральні магістралі. Ці зони вирізняються високою завантаженістю, що призводить до значного зростання концентрації діоксиду азоту ( $\text{NO}_2$ ), оксиду вуглецю ( $\text{CO}$ ) та твердих часток, особливо під час пікових годин руху автотранспорту. Регулярний моніторинг показує, що рівні цих забруднювачів часто перевищують встановлені норми якості повітря, що створює серйозні екологічні ризики для здоров'я населення [5].

Дані, отримані зі стаціонарних станцій моніторингу атмосферного повітря, є ключовими для створення моделей прогнозування. Стаціонарні станції збирають інформацію про концентрацію забруднюючих речовин у повітрі в реальному часі, що дозволяє виявляти періоди та місця з найвищим рівнем забруднення. Наприклад, дослідження показують, що саме в ранкові та вечірні години (піковий час) концентрації забруднювачів значно зростають через збільшення транспортного потоку.

Покращення існуючих систем моніторингу за рахунок впровадження системи прогнозування забезпечує значний прогрес у ефективності контролю якості повітря та управління транспортними потоками [6]. Традиційні системи моніторингу, які працюють у режимі реального часу, дають змогу виявляти поточний рівень забруднення, однак вони не дозволяють заздалегідь передбачати майбутні проблеми або визначати періоди підвищеного ризику.

Впровадження системи прогнозування дозволяє інтегрувати реальні дані моніторингу з моделями, що враховують транспортні потоки, погодні умови, а також інші фактори, які впливають на розсіювання та

накопичення забруднювальних речовин. Це забезпечує можливість заздалегідь виявляти потенційні зони з підвищеним рівнем забруднення і вживати відповідних заходів для запобігання перевищенню допустимих норм.

Такі вдосконалені системи дозволяють містам ідентифікувати ділянки з найбільш інтенсивним забрудненням, прогнозувати, коли і де можуть виникнути критичні рівні забруднення і оперативно реагувати на ці прогнози. Завдяки цим даним можна оптимізувати транспортні потоки, змінювати схеми руху або обмежувати в'їзд у певні райони під час пікових годин. Це сприяє не лише зменшенню навантаження на транспортну інфраструктуру, але й знижує рівень викидів шкідливих речовин в атмосферу.

Застосування таких моделей дозволяє міським планувальникам і екологічним службам передбачати періоди високого ризику, коли концентрації забруднювачів перевищують безпечні норми, і вживати відповідних заходів. Це може включати тимчасові обмеження на використання приватного транспорту в найбільш забруднених зонах, перенаправлення потоків транспорту або запровадження зон з обмеженими викидами. Крім того, прогнозування забруднення може бути використане для інформування населення про високий рівень забруднення і відповідні рекомендації щодо зменшення впливу на здоров'я (наприклад, обмеження часу на відкритому повітрі у періоди підвищеної концентрації забруднюючих речовин).

Крім того, системи прогнозування можуть сприяти поліпшенню довгострокового планування міської інфраструктури [7]. Наприклад, на основі прогнозів можна планувати будівництво нових доріг, розвиток громадського транспорту або інвестиції в екологічні транспортні рішення, такі як електромобілі чи велосипедні доріжки. Таким чином, інтеграція систем прогнозування в існуючі системи моніторингу підвищує їхню ефективність і надає містам можливість не лише контролювати поточний стан навколишнього середовища, але й активно впливати на зменшення забруднення в майбутньому.

Таким чином, моніторинг у реальному часі є важливою основою для розробки ефективних прогнозних моделей, які допомагають не лише оцінювати поточний стан якості повітря, а й передбачати майбутні зміни та оптимізувати управління транспортними потоками для мінімізації забруднення атмосфери.

В Україні, включаючи Кривий Ріг, впровадження таких систем дозволить значно покращити управління міським транспортом і зменшити екологічний вплив на населення.

Запропонована система прогнозування, є комплексною моделлю, що поєднує існуючі методики оцінки викидів з локальними даними про інтенсивність руху транспорту та погодні умови. Вона здатна розраховувати кількість шкідливих викидів для різних типів транспортних засобів, таких як легкові автомобілі, вантажівки та автобуси, з врахуванням їх витрати пального та інтенсивності експлуатації. Важливим аспектом моделі є її адаптивність до місцевих умов Кривого Рогу, де великі відстані маршрутів обумовлені географічними та інфраструктурними особливостями міста. Кривий Ріг – місто з довгими транспортними магістралями, що з'єднують різні промислові та житлові райони. Через таку специфіку транспортні потоки значно варіюються в різних частинах міста, і це впливає на розподіл забруднювальних речовин.

Додатково, великий відсоток старих транспортних засобів збільшує кількість викидів, особливо на довгих маршрутах, де автомобілі працюють на низькій швидкості або з частими зупинками. Адаптація моделі до цих умов дозволяє враховувати не лише інтенсивність руху, але й витрати палива та особливості трафіку. Зокрема, система прогнозування дозволяє аналізувати вплив транспортних заторів на різних відрізках доріг та розробляти рішення для їх мінімізації.

Для візуалізації даних у системі прогнозування використовуються **прогнозні карти забруднення (малюнок 1)**, які дозволяють наочно показати зони з найбільшим рівнем забруднення атмосфери. Такі карти створюються на основі реальних даних моніторингу викидів автотранспорту та результатів прогнозування, враховуючи інтенсивність руху, погодні умови та інші фактори. Вони допомагають виявляти "гарячі точки" – ділянки з найвищою концентрацією забруднювальних речовин.

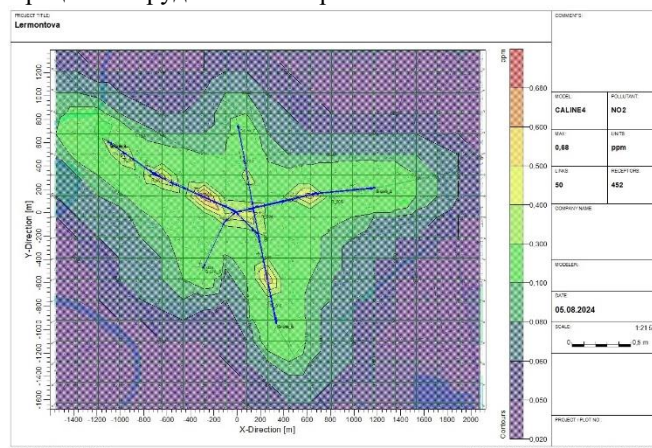


Рис. 1

Ці карти дають можливість міським службам швидко приймати рішення для зменшення рівня забруднення в таких зонах. Наприклад, на основі прогнозних карт можуть бути запроваджені зміни в

організації руху, обмеження для транспорту з високим рівнем викидів або розроблені рекомендації для жителів щодо часу перебування на вулиці під час пікових періодів забруднення.

Прогнозні карти не лише показують поточний стан повітря, а й дозволяють побачити, як буде змінюватися якість повітря в залежності від змін в транспортній інфраструктурі, кількості транспорту або погодних умов [8]. Це робить їх потужним інструментом для прийняття рішень у сфері екологічного планування та управління транспортом.

Дослідження показують, що прогнозні карти забруднення ефективно використовуються в багатьох містах для зменшення впливу автотранспорту на якість повітря, зокрема завдяки їхній здатності передбачати критичні ситуації й надавати інформацію в реальному часі [8].

Однією з основних переваг систем прогнозування є можливість більш ефективного управління транспортними потоками та запобігання утворенню заторів, які є основними джерелами збільшених викидів. Коли автомобілі стоять у заторах або часто зупиняються та прискорюються, витрати пального значно збільшуються, що, у свою чергу, призводить до підвищення рівня викидів таких шкідливих речовин, як діоксид азоту (NO<sub>2</sub>), оксид вуглецю (CO) та тверді частки. У великих промислових містах, таких як Кривий Ріг, проблема забруднення повітря набуває особливої актуальності через високе навантаження на екологію від інтенсивної діяльності промислових підприємств та значного транспортного потоку. Комбінація промислових викидів і транспортного забруднення створює значний екологічний ризик для мешканців, погіршуючи якість повітря та сприяючи зростанню кількості респіраторних та серцево-судинних захворювань.

Пропонована система прогнозування дозволяє завчасно передбачати періоди високої інтенсивності руху, аналізуючи дані про поточний трафік і враховуючи погодні умови та інші чинники, що впливають на рух транспорту. Це надає можливість місту вчасно впроваджувати заходи, спрямовані на полегшення транспортних потоків та уникнення заторів.

Зміна маршрутів шляхом їх оптимізації та перенаправлення транспортних потоків на менш завантажені дороги, дозволить уникнути утворення заторів, де концентрація автомобілів призводить до значного зростання викидів.

Запровадження обмежень на в'їзд до центрів міст або до районів з високим рівнем забруднення у години пік допомагає зменшити навантаження на транспортну інфраструктуру та знижує кількість транспортних засобів у таких зонах.

Підвищення ефективності громадського транспорту, запровадження спеціальних смуг для автобусів, а також стимулювання використання електричного транспорту знижують кількість приватних автомобілів на дорогах, що суттєво зменшує викиди від автотранспорту.

Зменшення заторів та оптимізація транспортних потоків не лише сприяють мінімізації викидів шкідливих речовин в атмосферу, але й покращують загальну ефективність руху в місті. Оптиміальне використання дорожньої інфраструктури дозволяє зменшити час у дорозі, що підвищує зручність для мешканців та знижує витрати на паливо.

Крім того, зниження викидів автотранспорту є важливим кроком у боротьбі з глобальним потеплінням і змінами клімату, оскільки автомобілі є значним джерелом викидів парникових газів, зокрема CO<sub>2</sub>. Запровадження системи заходів, таких як прогнози заторів і заходи для їх запобігання, дозволяють містам досягати своїх екологічних цілей і поліпшувати здоров'я мешканців, зменшуючи ризики, пов'язані із забрудненням повітря, такими як захворювання дихальних шляхів і серцево-судинні хвороби.

Таким чином, системи прогнозування мають важливе значення для сучасних міст, оскільки дозволяють не лише оперативно реагувати на проблеми, пов'язані з транспортом і екологією, але й запобігати їх виникненню в майбутньому.

### Висновки

Інтеграція систем прогнозування в інфраструктуру екологічного моніторингу Кривого Рогу є важливим кроком у вирішенні проблеми зростаючого забруднення повітря, викликаного сукупними викидами автотранспорту та промисловими підприємствами. Поєднання даних моніторингу в реальному часі з прогнозними моделями дає міським планувальникам змогу використовувати більш ефективні підходи до управління транспортними потоками. Це дозволяє заздалегідь ідентифікувати проблемні зони та вживати заходи для зниження забруднення до того, як ситуація стане критичною. Завдяки такій інтеграції можна впроваджувати комплексні рішення для оптимізації руху транспорту, зниження викидів і покращення якості повітря, спираючись на прогнози щодо майбутніх змін у навантаженні на транспортну мережу та екологічний стан.

Майбутні дослідження повинні зосередитися на вдосконаленні алгоритмів прогнозування, включаючи не тільки дані про рух транспорту, але й додаткові екологічні фактори, такі як промислові викиди та урбаністичні теплові острови. Це допоможе підвищити точність моделей прогнозування та враховувати складнішу взаємодію різних джерел забруднення, характерну для великих промислових міст.

Крім того, розширення мережі моніторингу дозволить отримувати більш точні дані для оцінки екологічного стану в різних частинах міста. Більша кількість станцій моніторингу дозволить ефективніше контролювати критичні зони та забезпечить більш своєчасне втручання, що знизить ризики для здоров'я населення та навколишнього середовища.

Таким чином, інтеграція прогнозних систем і вдосконалення існуючих підходів моніторингу відкриває нові можливості для поліпшення екологічної ситуації в Кривому Розі і подібних індустріальних містах.

Це дозволяє не лише зменшити екологічний вплив транспорту, а й покращити стан здоров'я мешканців міста, запобігаючи перевищенню допустимих норм забруднення, що є важливим для зменшення захворюваності на дихальні та серцево-судинні хвороби.

### Література

1. Air quality in Europe – 2020 report. EEA Report No 9/2020. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2020-report>
2. Emisia – COPERT: Emission Calculation Tool for Road Transport. <https://www.emisia.com/copert>
3. MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator), U.S. Environmental Protection Agency (EPA). URL: <https://www.epa.gov/moves>
4. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. Щорічний звіт про стан довкілля в Україні, 2020 рік. Київ, 2021. <https://mepr.gov.ua/>
5. Лист відокремленого структурного підрозділу міністерства охорони здоров'я України «Криворізький районний відділ державної установи «Дніпропетровський обласний центр контролю та профілактики хвороб міністерства охорони здоров'я України» №104213.0.4 від 16.03.2023 р.
6. Bhatti, M.A., Song, Z., Bhatti, U.A. et al. AIoT-driven multi-source sensor emission monitoring and forecasting using multi-source sensor integration with reduced noise series decomposition. *J Cloud Comp* 13, 65 (2024). <https://doi.org/10.1186/s13677-024-00598-9>
7. Tao, X.; Cheng, L.; Zhang, R.; Chan, W.K.; Chao, H.; Qin, J. Towards Green Innovation in Smart Cities: Leveraging Traffic Flow Prediction with Machine Learning Algorithms for Sustainable Transportation Systems. *Sustainability* 2024, 16, 251. <https://doi.org/10.3390/su16010251>
8. Guo, Y.; Zhang, Q.; Lai, K.K.; Zhang, Y.; Wang, S.; Zhang, W. The Impact of Urban Transportation Infrastructure on Air Quality. *Sustainability* 2020, 12, 5626. <https://doi.org/10.3390/su12145626>

### References

1. Air quality in Europe – 2020 report. EEA Report No 9/2020. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020. <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2020-report>
2. Emisia – COPERT: Emission Calculation Tool for Road Transport. <https://www.emisia.com/copert>
3. MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator), U.S. Environmental Protection Agency (EPA). URL: <https://www.epa.gov/moves>
4. Ministerstvo zakhystu dovkillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy. Shchorichnyi zvit pro stan dovkillia v Ukraini, 2020 rik. Kyiv, 2021. <https://mepr.gov.ua/>
5. Lyst vidokremlenoho strukturnoho pidrozdilu ministerstva okhorony zdorovia Ukrainy «Kryvorizkyi raionnyi viddil derzhavnoi ustanovy «Dnipropetrovskiyi oblasnyi tsentr kontroliu ta profilaktyky khvorob ministerstva okhorony zdorovia Ukrainy» №104213.0.4 vid 16.03.2023 r.
6. Bhatti, M.A., Song, Z., Bhatti, U.A. et al. AIoT-driven multi-source sensor emission monitoring and forecasting using multi-source sensor integration with reduced noise series decomposition. *J Cloud Comp* 13, 65 (2024). <https://doi.org/10.1186/s13677-024-00598-9>
7. Tao, X.; Cheng, L.; Zhang, R.; Chan, W.K.; Chao, H.; Qin, J. Towards Green Innovation in Smart Cities: Leveraging Traffic Flow Prediction with Machine Learning Algorithms for Sustainable Transportation Systems. *Sustainability* 2024, 16, 251. <https://doi.org/10.3390/su16010251>
8. Guo, Y.; Zhang, Q.; Lai, K.K.; Zhang, Y.; Wang, S.; Zhang, W. The Impact of Urban Transportation Infrastructure on Air Quality. *Sustainability* 2020, 12, 5626. <https://doi.org/10.3390/su12145626>