

УДК 504.3.054

С.Я. МАЙСТРЕНКО*, В.І. НОЧВАЙ*, Т.О. ДОНЦОВ-ЗАГРЕБА*, К.В. ХУРЦИЛАВА*,
І.В. КОВАЛЕЦЬ*

ГЕОІНФОРМАЦІЙНА ВЕБ-СИСТЕМА ПРЕДСТАВЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ІНВЕНТАРИЗАЦІЇ ВИКИДІВ АТМОСФЕРНИХ ЗАБРУДНЕНЬ У М. КИЇВ

*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. У даній роботі вперше розроблено геоінформаційну веб-систему представлення результатів інвентаризації викидів атмосферних забруднень у м. Київ від промислових підприємств на підставі обробки даних Держстатистики, а також оцінки георозподілених полів викидів від автотранспорту. В цій системі наявна інформація про викиди 21-ої забруднюючої речовини, зокрема, усіх тих, для яких державними відомствами здійснюється регулярний моніторинг у м. Київ. Система доступна за посиланням <http://env.kiev.ua:8080/pollutionsystem/pollutionsystem.html>. Навіть не зареєстровані користувачі можуть ознайомитись з її основними функціональними можливостями – виведенням розташування на карті промислових джерел викидів за обраною речовиною та відповідних обсягів викидів. Розроблена система може використовуватись у поєднанні з існуючими громадськими і державними системами моніторингу вмісту забруднюючих речовин у повітрі у межах м. Київ для попереднього (скринінгового) аналізу можливих причин утворення високих рівнів забруднень при їх спостереженні системами моніторингу. В роботі наведений відповідний приклад використання системи для пояснення високих рівнів концентрацій сірководню на одній із станцій у м. Київ. Іншим призначенням системи може бути виявлення недоліків існуючої інвентаризації промислових викидів, а саме відсутності інформації про певні джерела, також перевірка та коригування даних щодо обсягів викидів від зареєстрованих джерел. Для повноцінного використання потенціалу розробки необхідне розширення функціональних можливостей системи у напрямі математичного моделювання розповсюдження забруднень внаслідок викидів від промислових підприємств та автотранспорту. Для цього також необхідно здійснити інтеграцію в системі даних моніторингу гідрометеорологічних параметрів та рівнів забруднень повітря у м. Київ.
Ключові слова: інвентаризація викидів, атмосферні забруднення, геоінформаційні системи.

Abstract. In the current work, there has been developed for the first time a geo-information web-system for presenting the results of the inventory of air pollution emissions in Kyiv from industrial enterprises on the basis of the processing of data from the State Statistics Service of Ukraine, as well as estimates of geodistributed emission fields from vehicles. The system contains information on emissions of 21 pollutants, including those that are regularly monitored in Kyiv by governmental agencies. The system is available via the link <http://env.kiev.ua:8080/pollutionsystem/pollutionsystem.html>. Its main features – viewing on the map the locations of industrial emission sources for the selected substance, and the corresponding amount of emissions – can be used even by unregistered users. The developed system can be used in combination with the existing public and state systems for monitoring of air pollution in Kyiv for preliminary (screening) analysis of possible causes of high levels of air pollution during their observing with the monitoring systems. The paper presents a relevant example of the system application to explain the high levels of hydrogen sulfide concentrations at one of the stations in Kyiv. Another purpose of the system may be to detect shortcomings in the existing inventory of industrial emissions, namely the lack of information on certain sources, as well as verification and adjustment of data on emissions from the registered sources. To fully use the system potential, it is necessary to expand its functionality in the direction of mathematical modeling of the spread of pollution due to emissions from industrial enterprises and vehicles. For this purpose, it is also necessary to integrate hydrometeorological parameters and levels of air pollution in Kyiv into the data monitoring system.

1. Вступ

Проблема атмосферного забруднення в Україні, зокрема, у м. Київ, останнім часом все частіше пригортає увагу дослідників [1–3]. Причиною цього є не тільки те, що підвищені рівні атмосферного забруднення регулярно фіксуються вимірами [4], але й численні нарікання мешканців Києва на незадовільний стан атмосферного повітря, запахи в окремих районах тощо (наприклад, [5]). Але на підставі одних тільки вимірів концентрацій забруднюючих речовин (ЗР) у повітрі у багатьох випадках неможливо визначити причини виникнення високих рівнів забруднень у конкретних випадках, тобто вказати джерело або перелік джерел викидів разом із відсотком їхнього внеску у створення відповідних спостережуваних рівнів вмісту ЗР у повітрі. З математичної точки зору для цього треба розв'язати обернену задачу атмосферного перенесення [6], тобто на підставі використання математичних моделей і наявних вимірів встановити місцезнаходження та обсяги викидів відповідних джерел шляхом мінімізації деякої функції якості. Але у більшості практичних випадків така задача є некоректно поставленою в математичному сенсі, тобто її розв'язок не єдиний. Ситуація може бути виправлена при використанні апріорної інформації про існуючі джерела викидів, яка тільки коригується у процесі розв'язання оберненої задачі. Необхідність збору і систематизації такої інформації для умов м. Київ підкреслювалась у роботах [2, 3]. Наразі існує єдине офіційне джерело такої інформації – база даних Держстатистики України «2-ТП Повітря», яка оновлюється щороку, а відповідні звіти публікуються (наприклад, [7]). Дані, зібрані у цій базі, мають ряд недоліків, зокрема: 1) представлені не усі наявні джерела промислових викидів, а тільки найбільш значні; 2) не визначені координати джерел викидів; 3) точність обсягів викидів викликає великі сумніви [2]. Але головним недоліком є те, що дані існуючої інвентаризації не доступні у відкритому доступі у георозподіленому вигляді. Ці дані надаються за запитом у вигляді ексель-файлів і мають бути оброблені спеціальним чином перш, ніж їх можна буде використати у дослідженнях з атмосферного забруднення.

Метою даної роботи є розробка геоінформаційної системи представлення результатів інвентаризації викидів атмосферних забруднень у м. Київ на підставі обробки та геоприв'язки даних звітів «2-ТП Повітря», а також оцінки викидів від автотранспорту.

2. Обробка даних інвентаризації викидів

Для створення системи за запитом у Держстатистики України були отримані дані щодо джерел викидів у м. Київ з 2014 по 2019 рр. Згідно з існуючими стандартами, звітність промислових підприємств здійснюється за широким переліком речовин, який налічує понад 130 найменувань [8]. Кожне окреме підприємство звітується за значно коротшим списком речовин, тобто тільки тих, які можуть утворюватись при діяльності даного підприємства. Але при обробці усіх підприємств у масштабах м. Київ відповідний список буде налічувати практично усі речовини з повного переліку [8]. Тому для обробки даних викидів були обрані насамперед ті речовини, для яких у межах м. Київ здійснюється моніторинг [4], а також деякі додаткові ЗР, які, на думку авторів, можуть бути особливо важливими в умовах міста. Це такі речовини: азотна кислота, аміак, ацетон, бензо(а)пірен, бензол, водню хлорид, водню ціанід, кислота оцтова, неметанові леткі органічні сполуки, оксид вуглецю, оксиди азоту (у перерахунку на діоксид азоту), речовини у вигляді суспендованих твердих частинок розміром 2,5 мкм та менше (PM_{2.5}), речовини у вигляді суспендованих твердих частинок розміром 10 мкм та менше (PM₁₀), речовини у вигляді суспендованих твердих частинок розміром більше 2,5 мкм і менше 10 мкм, сажа, сірки діоксид, сірководень, стійкі органічні забруднювачі, толуол, фенол, фтористий водень.

Для географічної прив'язки підприємств були використані поля «koatu» та «TEF» (код території фактичного здійснення діяльності підприємства), а також адреси підприємств, наявні у базі «2-ТП Повітря». На підставі наявної інформації шляхом пошуку на картографічній основі Google Earth встановлювались приблизні географічні координати викидів відповідних підприємств. У ряді випадків відповідна інформація була відсутня і її мали уточнювати на підставі назви підприємства та даних ресурсу opendatabot.ua. Таким чином, був сформований список підприємств-забруднювачів у межах м. Київ і їх координат разом із річними обсягами викидів речовин за переліченим у попередньому параграфі списком згідно з даними Держстатистики.

Оцінка обсягів викидів оксиду вуглецю, діоксиду сірки та діоксиду азоту від автотранспорту за різні роки (з 2014 по 2019 включно) та їх геопросторового розподілу здійснювалась на підставі методики, представленої у роботі [2]. Вхідними даними при використанні даної методики слугували дані щодо інтегральних обсягів викидів ЗР за відповідні роки Головного управління статистики у м. Київ (<http://kiev.ukrstat.gov.ua>). Як і в роботі [2], розрахунки обсягів викидів від автотранспорту проводились на сітці 17x15 комірок із роздільною здатністю 2x2 кілометри. Приклади розрахованих полів викидів від автотранспорту наведені у розд. 4.

3. Програмна реалізація системи

Система представлення результатів інвентаризації викидів розроблена в архітектурі веб-сервер – веб-клієнт. Для розробки серверної частини використано веб-сервер Apache Tomcat та СУБД PostgreSQL. Клієнтська частина виконана як тонкий клієнт, що вимагає від користувача для доступу до системи лише наявності браузера. Тестування проводилось для двох найбільш розповсюджених браузерів, таких як Google Chrome та FireFox. Схематично структура системи зображена на рис. 1. У даній реалізації веб-сервер та клієнтська частина системи функціонують на комп'ютері з характеристиками: процесор Intel(R) Core(TM) i5-8400 CPU @ 2.8 ГГц, 6 ядер, 16 Гб оперативної пам'яті, жорсткий диск об'ємом 2 Тб.

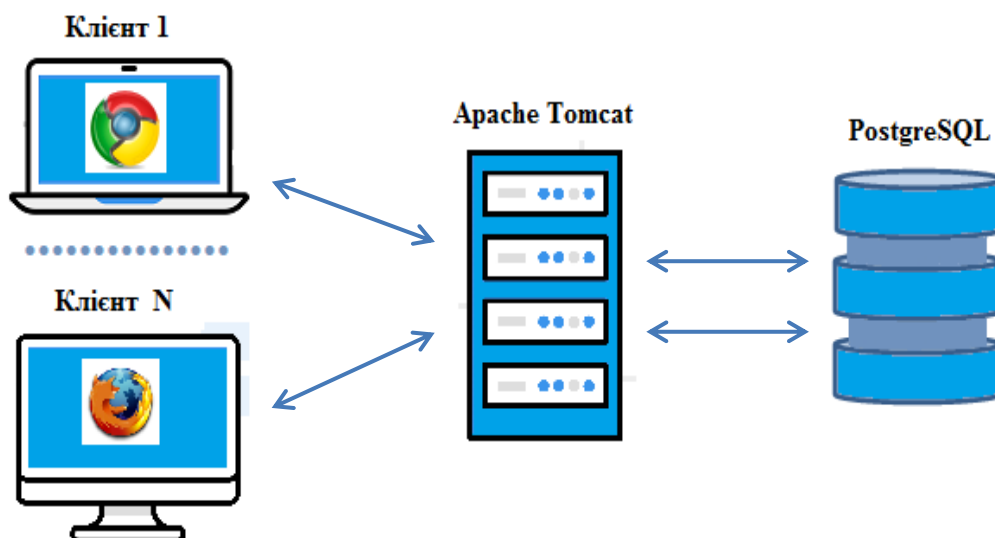


Рисунок 1 – Структура веб-системи

Користування системою можливе у двох основних режимах: простий перегляд даних та вхід з авторизацією для надання додаткових можливостей, таких як виконання експорту даних забруднення. В обох режимах користувачі мають можливість подавати пові-

домлення стосовно відсутніх у БД джерел забруднення та коментарі до наявних у системі джерел. Додатково розроблений режим адміністратора для завантаження до системи нових даних та опрацювання повідомлень і коментарів усіх користувачів. Система забезпечує можливість перегляду результатів інвентаризації забруднення міста Києва та розрахункових даних щодо забруднення від автотранспорту у вигляді таблиць та візуалізації на карті. Також дані, відібрані за вказаними користувачем параметрами, можуть бути експортовані зареєстрованими користувачами у txt або xlsx файли для аналізу сторонніми засобами.

Для розробки серверної частини обрано сучасний сервер додатків – Apache Tomcat із використанням мови Java. Вибір Apache Tomcat зумовлений переліком переваг, таких як відкритий вихідний код та кросплатформність; наявність регулярних оновлень для забезпечення сумісності з іншими версіями використовуваного програмного забезпечення; можливість налаштування Tomcat для запуску декількох веб-програм на різних портах. Слід також зазначити, що версія Apache Tomcat (9.055) була обрана з урахуванням відомої проблеми вразливості Apache Tomcat, Ghostcat (<https://www.chaitin.cn/en/ghostcat>). Для зберігання даних обрано вільну кросплатформну СУБД PostgreSQL 12 з можливістю секціонування даних. Було проведено дослідження для вибору ефективного методу секціонування [9]. Серед способів секціонування перевага була надана декларативному секціонуванню таблиць. Даний спосіб секціонування передбачає явне визначення ключових значень кожної секції за вказаним ідентифікатором. При завантаженні даних для поточного року (ідентифікатор рік) необхідно створювати нові секції у таблицях БД. Для автоматизації процесу створення секцій були написані додаткові функції PL/pgSQL.

Клієнтська частина реалізована з використанням мов HTML та javascript. Для візуалізації на карті використовуються відкритий веб-картографічний проєкт OpenStreetMap та javascript-бібліотека Leaflet. Обрано одну із двох найбільш популярних у веб-картографії схем – fluid map layouts [10]. При використанні даної схеми карта займає всю HTML-сторінку, а все інше наповнення системи розміщується на картографічну область і переважно може бути переміщене за бажанням користувача в місцеположення, відмінне від положення за замовчуванням для забезпечення необхідного масштабування карти.

4. Робота з системою

4.1. Функціональні можливості

Розроблена в роботі система «Джерела забруднення м. Києва» доступна за посиланням <http://env.kiev.ua:8080/pollutionsystem/pollutionsystem.html>. Основна функціональність системи доступна незареєстрованим користувачам, тоді як для використання деяких функцій, таких, як експорт даних, необхідна авторизація. Користувач має можливість переглянути завантажені до БД дані стосовно забруднення міста Києва. Вибір конкретного джерела забруднення можна обрати з загального переліку джерел, занесених до БД, або з переліку джерел, відібраних за вказаними користувачем параметрами. Так, після вибору року інвентаризації, одночасно до 5 забруднювачів та проценту вибірки результати запиту будуть відображені маркерами на карті. Наприклад, щоб переглянути 10% найбільш потужних джерел діоксиду сірки за 2017 рік, слід обрати параметри, як на рис. 2. Обравши джерело забруднення на карті, можна переглянути наявні в БД дані для конкретного забруднювача по роках (рис. 3). Перелік джерел, отриманий за запитом, можна також переглянути у вигляді таблиці та виконати експорт даних у txt/xlsx файл.

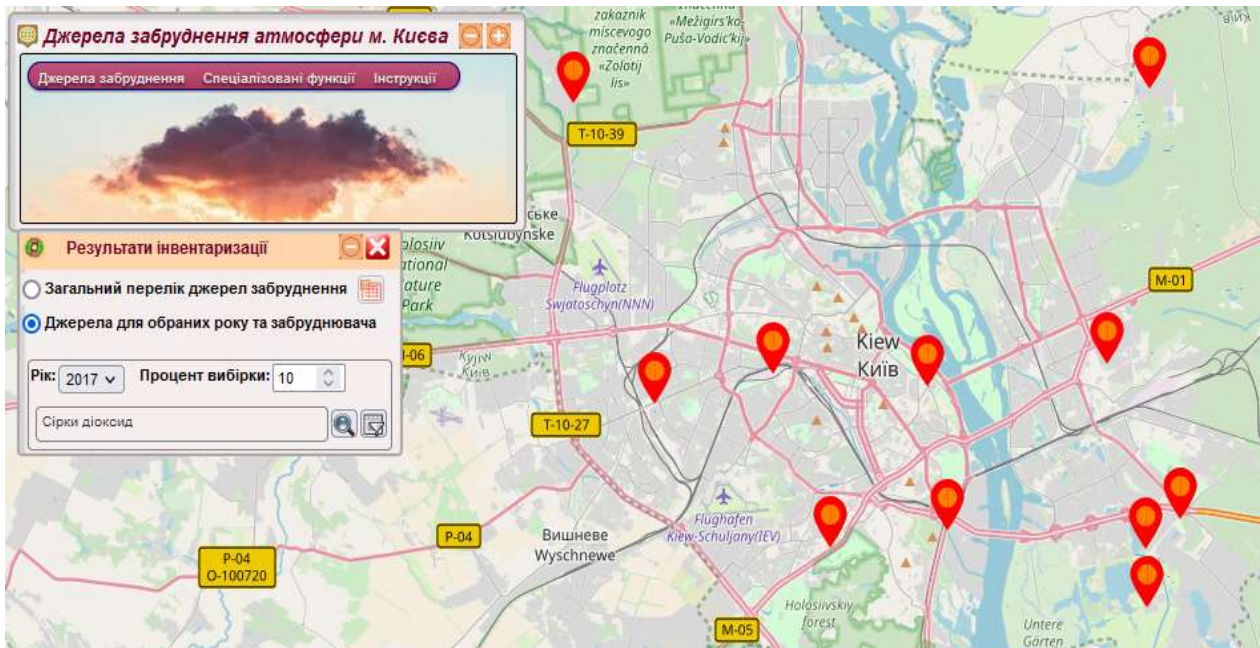


Рисунок 2 – Вибір для показу на карті 10% найбільш потужних джерел діоксиду сірки

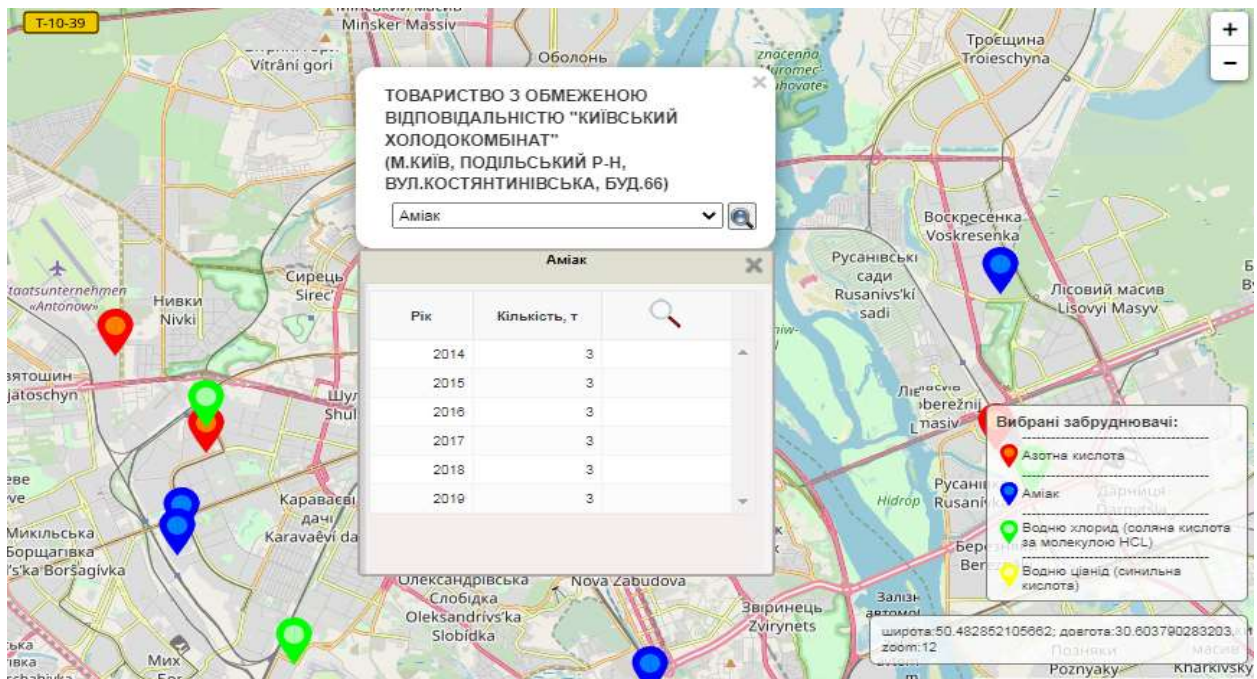


Рисунок 3 – Візуалізація результатів запити за параметрами даних інвентаризації та показники для обраних джерела та ЗР

Аналогічно, обравши рік забруднення та забруднювач, можна переглянути розрахункові дані по забрудненню автотранспортом (рис. 4). За допомогою миші можна переглянути значення для конкретної комірки розрахункової сітки. Дані також можуть бути представлені у табличному вигляді та експортовані до txt/xlsx файла. Додатково користувачі можуть подати повідомлення стосовно відсутніх у БД джерел забруднень. При виявленні можливих помилок користувачі також можуть надіслати коментарі про джерела, наявні в базі даних системи.

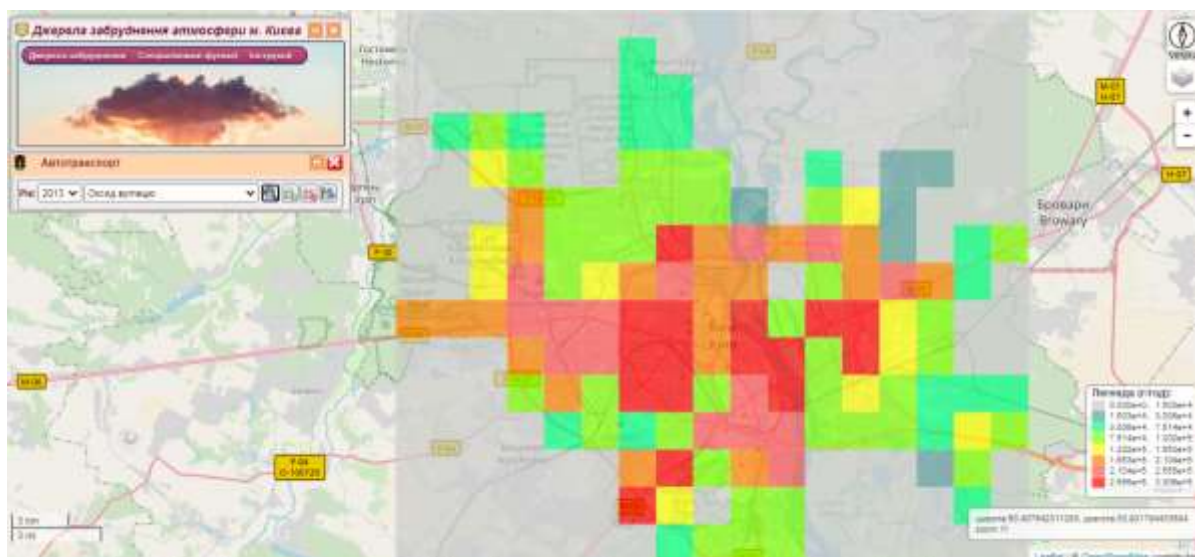


Рисунок 4 – Забруднення від автотранспорту (інтенсивність викиду г/год із кожної комірки 2х2 км)

4.2. Приклади використання системи для аналізу причин високих рівнів забруднень

Наведемо приклад використання розробленої системи для аналізу причин високих рівнів забруднень у конкретних епізодах. Останнім часом за підтримки Київської міської державної адміністрації (КМДА) у м. Київ встановлено чотири автоматизованих станції моніторингу атмосферних забруднень. Концентрації найбільшої кількості речовин вимірюються станцією на вул. Вербицького, 26 (Харківський масив) із часовим інтервалом 10 хв. Відповідні дані вимірів представлені на ресурсі asm.kyivcity.gov.ua. За даними цієї станції за період з 16.11.2021 по 16.12.2021 концентрації більшості речовин (озон, оксид вуглецю, діоксид сірки, діоксид азоту, формальдегід, PM10) були в нормі, тобто їх середньодобові значення не перевищували максимальних разових гранично допустимих значень (ГДК_{мр}). Перевищення ГДК_{мр} за вказаний період відбулось для двох показників: PM2.5 (один випадок – 17 листопада 2021 р.) та сірководень H₂S (чотири випадки – 16, 17, 28 листопада та 4 грудня 2021 р.).

Щодо дрібнодисперсних частинок PM2.5, то їх основними джерелами є автотранспорт, практично усі промислові підприємства, вітровий підйом пилу тощо. Тому з'ясування відносного впливу різних джерел у випадку перевищення ГДК за даним показником неможливе без застосування математичних моделей атмосферного перенесення. Для сірководню можна провести скринінговий аналіз шляхом використання розробленої системи. Як видно з рис. 5, для усіх дат, коли були перевищені ГДК сірководню на Харківському масиві, значення напрямку вітру були в діапазоні від 190 до 220 град, тобто від майже південного до південно-південно-західного. На рис. 6 представлені джерела сірководню на південь від Харківського масиву. Це усього два підприємства. Близько 99% викидів сірководню з цих двох підприємств дає Бортницька станція аерації. Її розташування також найбільш відповідає південному напрямку вітру, при якому спостерігалось перевищення ГДК сірководню на Харківському масиві. Слід зазначити, що викид відбувається не з точки, позначеної на карті, як місце розташування підприємства, а, що найбільш ймовірно, із блоку № 2 Бортницької станції, який також видно на карті, оскільки його розташування ідеально відповідає спостереженим напрямкам вітру. Цей приклад також ілюструє ситуацію, що у випадках, коли просторовий розмір території підприємства співставний із відстанню від підприємства до точки вимірів, оцінки джерел викидів, які відповідають за високі рівні концентрації, мають уточнюватись з урахуванням можливого розміщення джерел у межах території підприємства.

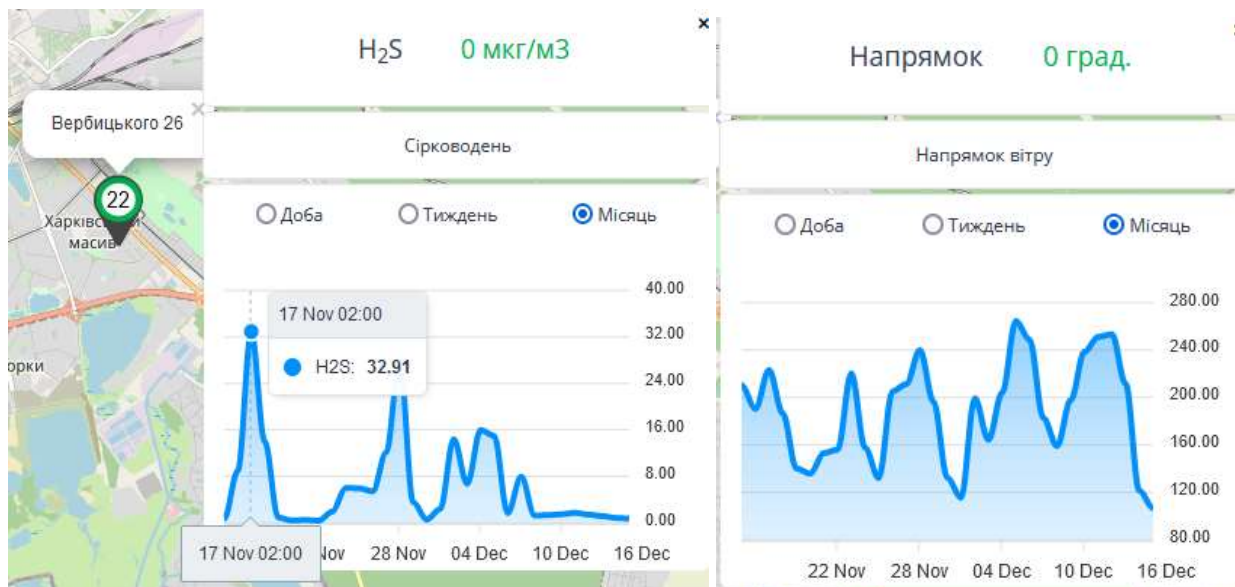


Рисунок 5 – Результати вимірів концентрації сірководню (зліва) та напрямку вітру (справа) на станції по вул. Вербицького, 26 у м. Київ за період з 16.11.2021 по 16.12.2021 за даними asm.kyivcity.gov.ua

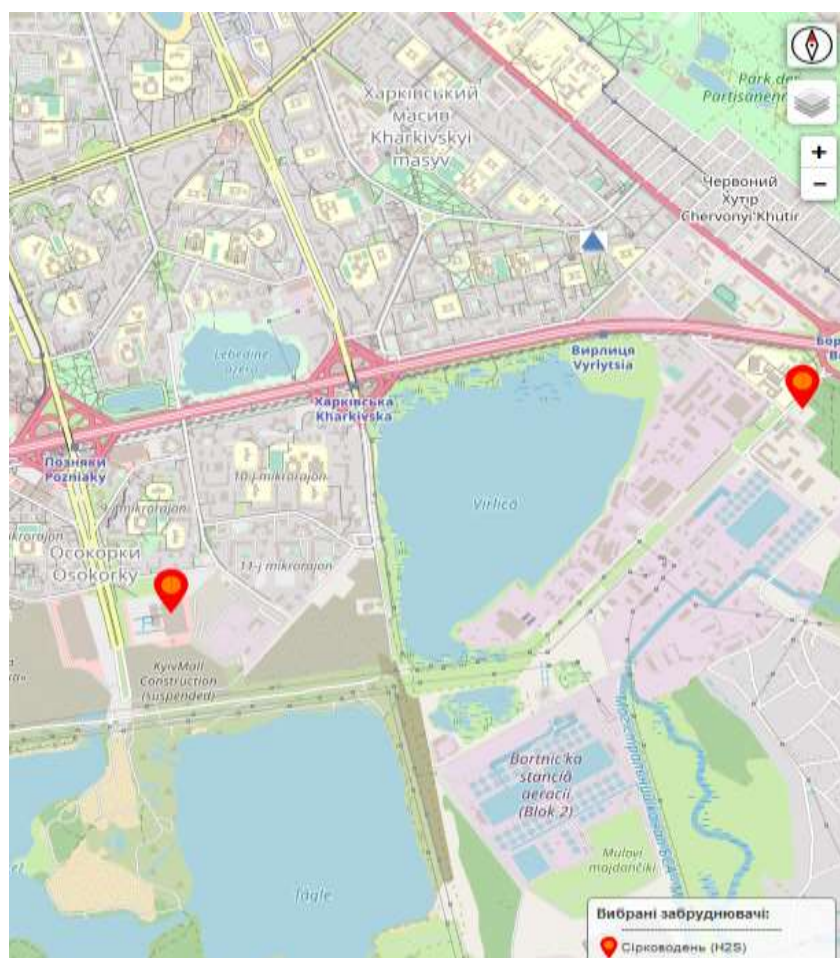


Рисунок 6 – Джерела сірководню в околиці Харківського масиву та розташування станції вимірів на вул. Вербицького, 26 (синій трикутник)

5. Висновки

У представленій роботі вперше розроблено геоінформаційну веб-систему представлення результатів інвентаризації викидів атмосферних забруднень у м. Київ від промислових підприємств на підставі обробки даних звітів Держстатистики «2-ТП Повітря», а також оцінки георозподілених полів викидів від автотранспорту. В системі наявна інформація про викиди 21-єї забруднюючої речовини, зокрема, усіх тих ЗР, для яких державними відомствами здійснюється регулярний моніторинг. Система доступна за посиланням <http://env.kiev.ua:8080/pollutionsystem/pollutionsystem.html>. Її основними функціональними можливостями, тобто переглядом розташування на карті промислових джерел викидів за обраною речовиною та відповідних обсягів емісій, можуть скористатись навіть не зареєстровані користувачі. Розроблена система може використовуватись у поєднанні з існуючими громадськими (www.saveecobot.com) і державними (asm.kyivcity.gov.ua, sgo-sreznevskiy.kyiv.ua) системами моніторингу вмісту забруднюючих речовин у повітрі в межах м. Києва для попереднього (скрінінгового) аналізу можливих причин утворення високих рівнів концентрацій при їх спостереженні системами моніторингу. В роботі наведений відповідний приклад використання системи для пояснення високих рівнів концентрацій сірководню на одній із станцій у м. Київ. Іншим призначенням системи може бути виявлення недоліків існуючої інвентаризації промислових викидів, а саме відсутності інформації про певні джерела, також перевірка та коригування даних щодо обсягів викидів від зареєстрованих джерел. Для повноцінного використання потенціалу розробки необхідне розширення функціональних можливостей системи у напрямі математичного моделювання розповсюдження забруднень внаслідок викидів від промислових підприємств та автотранспорту. Для цього також необхідно здійснити інтеграцію в системі даних моніторингу гідрометеорологічних параметрів та рівнів забруднень повітря у м. Київ. Включення нових даних інвентаризації за останні роки в систему на даний час потребує певного обсягу ручної роботи і не може бути повністю автоматизоване з огляду на відсутність геопросторової прив'язки у базі даних Держстатистики та зміни назв підприємств і їх кодів.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Popov O., Iatsyshyn A., Kovach V., Artemchuk V., Kameneva I., Taraduda D., Sobyna V., Sokolov D., Dement M., Yatsyshyn T. Risk Assessment for the Population of Kyiv, Ukraine as a Result of Atmospheric Air Pollution. *Journal of Health and Pollution*. 2020. Vol. 10, N 25. P. 200303. DOI: 10.5696/2156-9614-10.25.200303.
2. Ковалець І.В., Халченков О.В., Ночвай В.І. Пілотне дослідження з комплексного моделювання атмосферного забруднення м. Київ. *Математичні машини і системи*. 2020. № 1. С. 61–72.
3. Ковалець І.В. Проблема не тільки в Чернобыле / под ред. К. Форста, О. Васильцовой. *IPG. Международная политика и общество. Аналитика. Дискусии. Мнения*. К.: Фонд ім. Фрідріха Еберта, 2020. С. 68–71. URL: <https://www.ipg-journal.io/rubriki/ehkologija-i-ustoichivoe-razvitie/statja/show/problema-ne-tolko-v-chernobyle-1053/>.
4. Мінекологія. Екологічний паспорт. Київ, 2018. URL: https://ecodep.kyivcity.gov.ua/files/2019/1/22/eco_pasport_2017.pdf.
5. Громадян хвилюють питання екологічної безпеки. Укрінформ 03.03.2021. URL: https://www.ukrinform.ua/rubric-other_news/3201083-gromadan-hviluut-pitanna-ekologicnoi-bezpeki.html.
6. Enting I.G. *Inverse problems in atmospheric constituent transport*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. 392 p.
7. Про затвердження форми державного статистичного спостереження № 2-ТП (повітря) (річна) «Звіт про викиди забруднюючих речовин і парникових газів в атмосферне повітря від стаціонарних джерел викидів»: Наказ Державної служби статистики України від 25.06.2021 р. № 162. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0162832-21#Text>.

8. Про затвердження Інструкції про порядок та критерії взяття на державний облік об'єктів, які справляють або можуть справити шкідливий вплив на здоров'я людей і стан атмосферного повітря, видів та обсягів забруднюючих речовин, що викидаються в атмосферне повітря. Міністерство екології та природних ресурсів України: Наказ Міністерства екології та природних ресурсів України від 10.05.2002 р. № 177. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0445-02#Text>.
9. Хурцилава К.В., Майстренко С.Я., Донцов-Загреба Т.О. Особливості секціонування у PostgreSQL на прикладі бази даних систем прогнозування екологічного забруднення. *Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2021*: міжнар. наук.-практ. конф. (м. Чернігів, 28 червня – 1 липня 2021 р.). Чернігів: ЧНТУ, 2021. С. 75–78.
10. Muehlenhaus I. *Web Cartography Map Design for Interactive and Mobile Devices*. Boca Raton FL: CRC Press, 2014. 254 p.

Стаття надійшла до редакції 14.01.2022