

УДК 504.5:628.47

O. O. MEDVEDIEVA¹, S. V. DZIUBA², M. M. BILIAIEV^{3*}, V. A. KOZACHYNA⁴,
P. S. KIRICHENKO⁵

¹M. S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Simferopolska St., 2a, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (098) 506 98 00, e-mail medvedevaolga1702@gmail.com, ORCID 0000-0001-5575-713X

²M. S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Simferopolska St., 2a, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (067) 257 50 44, e-mail sergejdzuba@gmail.com, ORCID 0000-0002-3139-2989

^{3*}Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail biliaiev.m@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

⁴Dep. «Hydraulics, Water Supply and Physics», Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI DIIT, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 09, e-mail v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

⁵Dep. «Heat, Gas, Water Supply, Water Drainage and Ventilation», Kryvyi Rih National University, Vitaly Matusevich St., 11, Kryvyi Rih, Ukraine, 50027, tel. +38 (056) 409 06 06, e-mail pasha_129@ukr.net, ORCID 0000-0002-0793-9593

Forecasting Zones of Air Pollution from Solid Waste Landfills

Purpose. The work is aimed at developing a mathematical model that allows to quickly calculate the area of chemical air pollution during the emission of hazardous substances from solid waste landfills. The mathematical model takes into account meteorological parameters, geometric shape of the landfill, intensity of emission of hazardous substances from the landfill. **Methodology.** The two-dimensional equation of convective diffusion transfer of a conservative impurity from the atmosphere is used to analyze the intensity and size of chemical air pollution during the emission of hazardous substances from the landfill. A difference scheme of splitting is used to numerically solve the equation of convective-diffusive transfer of an impurity. The emission of hazardous substances from the landfill is modeled using the Dirac delta function. **Findings.** The developed mathematical model takes into account the main physical factors that affect the process of dispersion of hazardous substances from the landfill. On the basis of the developed numerical model, a computational experiment was conducted to assess the impact of the landfill on the environment. **Originality.** On the basis of the developed numerical model, a computer code was developed that allows predicting chemical pollution of the atmospheric wind and the underlying surface in the event of emission of hazardous substances from the surface of a solid waste landfill. The developed model and computer code make it possible to quickly assess the extent and intensity of environmental pollution from landfills, which is important when selecting sites for new or reconstructed landfills. **Practical value.** The software implementation of the developed numerical model was carried out, and a computational experiment was conducted to illustrate the effectiveness of using the model to solve applied problems related to the impact of landfills on the environment. The results of the numerical experiment are presented.

Keywords: solid waste landfill; environmental pollution; forecasting; air pollution; mathematical model

Introduction

Solid waste landfills are long-term sources of environmental pollution. Almost every country has a significant number of such landfills (Fig. 1).

Therefore, considerable attention is paid to the problem of assessing the impact of solid waste landfills on the environment, the emission of hazardous substances from landfills [2–7, 10] and the problems of reducing the negative impact on the environment [4].

As a rule, landfills occupy a significant area. Over time, hazardous substances infiltration from

the landfill site into the aeration zone occurs and the groundwater beneath the landfill is contaminated.

In addition, very often at these landfills there is a fire of various areas (Fig. 2) and over time quite significant areas of burning garbage can be created (Fig. 3). During the operation of the landfill, burning garbage at landfills releases methane, CO, ammonia and other hazardous substances into the atmospheric air. Thus, significant areas of chemical pollution are formed in the atmosphere in terms of length and intensity, which can cause pollution not only of forests, agricultural lands, but also of air in settlements.

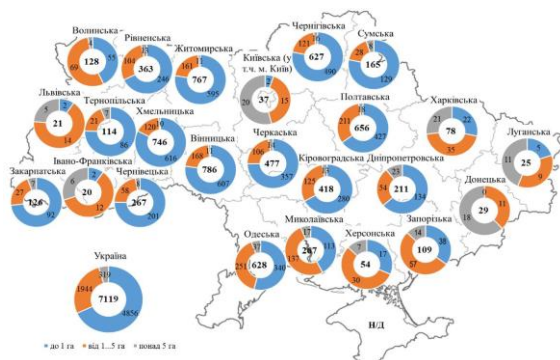


Fig. 1. Number of landfills and landfills by region of Ukraine in 2021 [7]



Fig. 2. Fire centers at the landfill (<https://cutt.ly/6rkLbR1N>)



Fig. 3. Large-scale burning at the landfill (<https://cutt.ly/WrkLbnkt>)

Due to the fact that the sizes of existing landfills increase over time, and new solid waste landfills are also created, an important task arises to predict areas of chemical contamination, the underlying surface when changing the sizes of landfills, during their reconstruction or when creating new landfills.

Determination of areas of chemical pollution of atmospheric air during emission of hazardous substances from solid waste landfills refers to the problem of predicting chemical pollution of at-

mospheric air from a source of technogenic pollution. To solve problems of this class, it is necessary to have special mathematical models that take into account the main physical factors that affect the distribution of chemically hazardous substances in atmospheric air, namely: convective transport of impurities, atmospheric diffusion, intensity of pollutant emission into the air environment, dimensions of the emission source (landfill). To solve problems of this class, the most widely used are the Gaussian model (for example, the commercial code AERMOD) [9, 11], numerical models [1, 8], analytical models. An effective method for solving such problems is the use of CFD models, which allow obtaining almost all the necessary information. However, the use of CFD models requires powerful computers (for example, for commercial codes ANSYS, COMSOL) and a significant amount of time for calculations. In practice, when designing landfills or reconstructing existing landfills, it is necessary to have special, fast-calculating models for the operational assessment of the impact of waste landfills on the environment. The development of such multifactorial and fast-calculating mathematical models («operational models») is a modern trend in the field of ecological safety, environmental protection and labor protection.

Purpose

Development of a numerical model for assessing areas of chemical pollution of atmospheric air due to the emission of hazardous substances from a solid waste landfill.

Methodology

In this paper, we will consider an express model for assessing areas of chemical pollution of atmospheric air. Therefore, the prediction of pollution areas is carried out on the basis of a 2D model of air pollution transport (planning model) [1, 2, 8]:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right) + \sum_{i=1}^N Q_i \delta(x - x_i) \delta(y - y_i), \quad (1)$$

where S – average (by transfer height) value of the concentration of a chemically hazardous substance; u, v – components of the wind speed vector in the

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

projection on the coordinate axis x, y in accordance; x_i, y_i – Cartesian, coordinates of the i -th source of emission of a chemically hazardous substance at the facility; t – time, s ; μ_x, μ_y – atmospheric turbulent diffusion coefficients; $\delta(x_i, y_i)$ – Dirac delta function, which is used to specify the location of the emergency release in the model. The emission intensity of a chemically hazardous substance is equal to Q .

For equation (1), the following boundary conditions are implemented:

1) at $t=0$ the impurity concentration in the study area is given;

2) at the boundary where the flow enters the study area, the condition is set $S=S_I$, where S_I – known impurity concentration;

3) at the boundary where the flow exits the study area is given by $\frac{\partial S}{\partial n} = 0$, where n – unit vector normal to the boundary.

For numerical integration of the transfer equation (1), its decomposition is carried out as follows:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial uS}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_x \frac{\partial S}{\partial x} \right), \quad (2)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial vS}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu_y \frac{\partial S}{\partial y} \right), \quad (3)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = \sum_{i=1}^n Q_{Si}(t) \delta(x - x_i) \delta(y - y_i). \quad (4)$$

For the numerical solution of equation (2), the following two-step splitting scheme is used:

– the first step uses the dependency:

$$S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = S_{i,j}^n - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^+ S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - u_{i,j}^+ S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^n + S_{i+1,j}^n}{2\Delta x^2}$$

– in the second step, the dependency is used:

$$S_{i,j}^{n+1} = S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{u_{i+1,j}^- S_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- S_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta x^2} + \Delta t \mu_x \frac{-S_{i,j}^{n+1} + S_{i+1,j}^{n+1}}{2\Delta x^2},$$

$$\text{where } u^+ = \frac{u + |u|}{2}, u^- = \frac{u - |u|}{2}.$$

For the numerical solution of equation (3), the following two-step decomposition scheme is used:

– the first step uses the dependency:

$$S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = S_{i,j}^n - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^+ S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - v_{i,j}^+ S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^n + S_{i,j+1}^n}{2\Delta y^2},$$

– in the second step, the dependency is used:

$$S_{i,j}^{n+1} = S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \Delta t \frac{v_{i,j+1}^- S_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- S_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + S_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{2\Delta y^2} + \Delta t \mu_y \frac{-S_{i,j}^{n+1} + S_{i,j+1}^{n+1}}{2\Delta y^2},$$

$$\text{where } v^+ = \frac{v + |v|}{2}, v^- = \frac{v - |v|}{2}.$$

For numerical integration of equation (4) the Euler method is used.

To assess the level of contamination of the underlying surface during the migration of impurities from the landfill, the dependence is used:

$$G = \int_0^T dt \iint_{S, z=0} (w_s + \mu\alpha) C(x, y, z=0, t) ds,$$

where t – time; S – surface area; α – coefficient that takes into account the «capture» of the to-bag; T – integration period.

When performing calculations, it was assumed $\alpha = \mu_z$.

Determining the amount of impurity that has reached the surface of the earth over a certain period of time makes it possible to scientifically determine the level of contamination of the site for calculation purposes to determine the damage.

Based on the developed numerical model, computer code was created. Programming language – FORTRAN.

To conduct a computational experiment based on the developed computer code, you need to specify the following data:

- 1) dimensions of the calculation area;
- 2) landfill location;
- 3) step in time;
- 4) values of atmospheric turbulent diffusion coefficients;
- 5) wind speed and direction;
- 6) intensity of impurity emission into atmospheric air.

When conducting a computational experiment, the following approaches are used:

1. When considering the process of impurity transfer on a scale of 10–15 km, for «pilot» calculations the position of the landfill is modeled as a difference cell where the emission source is located.

2. When considering the process of impurity transfer at a scale of 3–5 km, for «pilot» calculations, the position of the landfill is modeled as a set of difference cells that “cover” the surface of the landfill – the emission source.

Findings

On the basis of the developed numerical model, the model problem is solved. The location of the probable landfill near the village was considered. It was assumed that the wind speed is 7 m/s. Two scenarios were considered: one landfill near the village and two landfills.

The modeling results are shown in Figs. 4–5. CO concentration at the landfill was equal to 100 (dimensionless concentration).

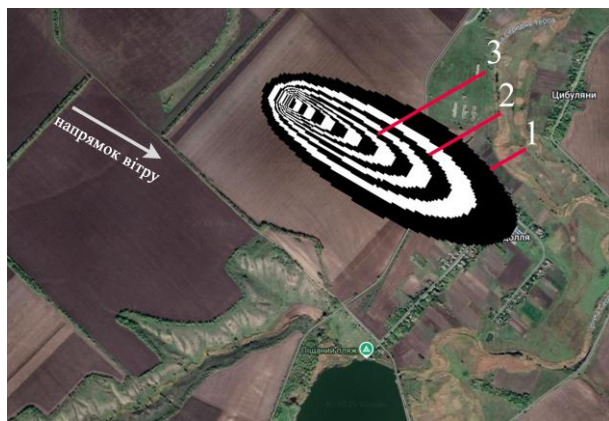


Fig. 4. CO pollution zone:
1 – $C = 11$; 2 – $C = 22$;
3 – $C = 34$

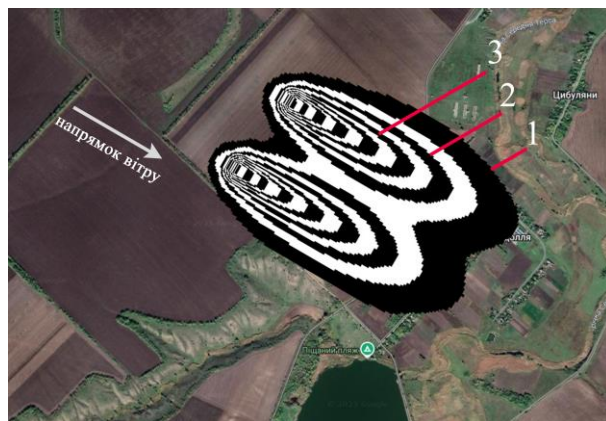


Fig. 5. CO pollution zone:
1 – $C = 13$; 2 – $C = 22$;
3 – $C = 34$

As can be seen from the above figures, the landfill will affect the territory of the village. Thus, creation of a polygon will lead to long-term deterioration of air quality in the settlement area. Creation of two polygons will lead to a significant increase in the width of the pollution area.

Calculation time 3 sec.

Originality and practical value

Based on the developed numerical model, a computer code was developed that allows predicting chemical pollution of atmospheric air and the underlying surface in the event of emission of hazardous substances from the surface of a landfill for solid household waste.

The developed model and computer code make it possible to quickly assess the size and intensity of environmental pollution from landfills, which is important when selecting sites for landfills being created or those that will be reconstructed.

Conclusions

1. A tool has been created for rapid assessment of atmospheric air pollution due to emissions of hazardous substances from solid waste landfills.

2. The assessment of the level of atmospheric air pollution is carried out on the basis of a fundamental model of continuum mechanics, which allows obtaining scientifically sound forecast results.

3. The developed mathematical model allows for a quick assessment of the level of air pollution, which is important for the practical use of this model.

LIST OF REFERENCES

1. Біляєв М. М., Біляєва В. В., Берлов О. В., Козачина В. А. *CFD-модельовання в аналізі ефективності систем захисту довкілля та працівників на робочих місцях*. Дніпро : Журфонд, 2022. 268 с.
2. Годовська Т. Б., Фещенко В. П. Критерії індикаторів впливу на агроєкосистеми полігону твердих побутових відходів м. Житомир. *Вісник ЖНАЕУ*. 2011. № 1, т. 1. С. 400–408.
3. *ДБН В.2.4-2-2005 Полігони твердих побутових відходів. Основні положення проектування. Зміна № 1 та Зміна № 2* [Чинний від 01.06.2020]. Міністерство розвитку громад та територій України. Київ, 2020. 100 с.
4. Жук Г. В., Предун К. М. Екологічні аспекти використання біогазів полігонів твердих побутових відходів для потреб енергопостачання населених пунктів України. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання*. 2018. Вип. 26. С. 69–74. DOI: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2018.26>
5. Орлова Т. О. *Оцінки екологічного стану земельних ділянок, зайнятих відходами та об'єктами поводження з ними* : дис. ... канд. техн. наук. Київ : КНУБА, 2008. 148 с.
6. Радовенчик В. М., Гомеля М. Д. *Тверді відходи: збір, переробка, складування*. Київ : Кондор, 2010. 550 с.
7. Сатін І. В., Куций Д. В. Емісії парникових газів з місць видалення побутових відходів та заходи щодо їх скорочення. *Наукові доповіді національного університету біоресурсів і природокористування України*. 2024. № 3 (109). С. 1–31. DOI: [https://doi.org/10.31548/dopovidi.3\(109\).2024.003](https://doi.org/10.31548/dopovidi.3(109).2024.003)
8. Biliaiev M. M., Kharytonov M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *Air Pollution Modeling and its Application XXI*. 2011. P. 87–91. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15
9. Ilic P., Ilic S., Stojanovic Bjelic L. Hazard Modelling of Accidental Release Chlorine Gas Using Modern Tool-Aloha Software. *Quality of Life (Banja Luka) – APEIRON*. 2018. Vol. 16, No. 1–2. P. 38–45. DOI: <https://doi.org/10.7251/qol1801038i>
10. Ngusale G., Oloko M., Kabok P., Otiende F., Ngusale G. Estimation of methane and landfill gas emission from an open dump site. *International Journal of Environment and Waste Management*. 2021. Vol. 28. Iss. 3. P. 317–327. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJEW.2021.118368>
11. Trung T. D. B., Tri D. Q. Application of the AERMOD Model to Evaluate the Health Benefits Due to Air Pollution from the Public Transport Sector in Ha Noi, Viet Nam. *Journal of Geoscience and Environment Protection*. 2022. № 10. P. 13–33. DOI: <https://doi.org/10.4236/gep.2022.103002>

О. О. МЕДВЕДЄВА¹, С. В. ДЗЮБА², М. М. БІЛЯЄВ^{3*}, В. А. КОЗАЧІНА⁴,
П. С. КІРІЧЕНКО⁵

¹Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України, вул. Сімферопольська, 2а, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (098) 506 98 00, ел. пошта medvedevaolga1702@gmail.com, ORCID 0000-0001-5575-713X

²Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України, вул. Сімферопольська, 2а, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (067) 257 50 44, ел. пошта sergejdzuba@gmail.com, ORCID 0000-0002-3139-2989

^{3*}Каф. «Гідраліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта biliaiev.m@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

⁴Каф. «Гідраліка, водопостачання та фізика», Український державний університет науки і технологій, ННІ ДІТ, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 09, ел. пошта v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

⁵Каф. «Теплогазоводопостачання, водовідведення і вентиляція», Криворізький національний університет, вул. Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, Україна, 50027, тел. +38 (056) 409 06 06, ел. пошта pasha_129@ukr.net, ORCID 0000-0002-0793-9593

Прогнозування зон забруднення атмосферного повітря від полігонів твердих побутових відходів

Мета. Робота спрямована на розробку математичної моделі, яка дозволяє швидко розрахувати зону хімічного забруднення атмосферного повітря в разі емісії небезпечних речовин від полігонів твердих побутових відходів. Математична модель повинна враховувати метеорологічні параметри, геометричну форму поліго-

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

ну, інтенсивність емісії небезпечних речовин від полігону твердих побутових відходів. **Методика.** Для аналізу інтенсивності та розмірів хімічного забруднення атмосферного повітря в разі емісії небезпечних речовин від полігону використано двовимірне рівняння конвективно-дифузійного переносу консервативної домішки від атмосфери. Чисельне розв'язання рівняння конвективно-дифузійного переносу домішки виконано за допомогою різницевої схеми розщеплення. Емісію небезпечних речовин від полігону змодельовано з використанням дельта-функції Дірака. **Результати.** Розроблена математична модель враховує основні фізичні фактори, що впливають на процес розсіювання небезпечних речовин від полігону. На основі розробленої чисельної моделі проведено обчислювальний експеримент для оцінки впливу полігону на навколишнє середовище. **Наукова новизна.** На базі запропонованої чисельної моделі розроблено комп'ютерний код, що дозволяє прогнозувати хімічне забруднення атмосферного повітря та підстильної поверхні у випадку емісії небезпечних речовин від поверхні полігону для твердих побутових відходів. Розроблена модель і комп'ютерний код дають можливість швидко оцінювати розміри та інтенсивність забруднення довкілля від полігонів, що важливо під час вибору ділянок під полігони, які створюють, або ті, що будуть реконструйовані. **Практична значимість.** Здійснено програмну реалізацію розробленої чисельної моделі, проведено обчислювальний експеримент, що проілюстрував ефективність використання моделі для розв'язання прикладних задач, які пов'язані з впливом полігонів на навколишнє середовище. Наведено результати чисельного експерименту.

Ключові слова: полігон твердих відходів; забруднення навколишнього середовища; прогнозування; забруднення повітря; математична модель

REFERENCES

1. Biliaiev, M. M., Biliaieva, V. V., Berlov, O. V., & Kozachyna, V. A. (2022). *CFD-modeliuvannya v analizi efektyvnosti system zakhystu dovkillia ta pratsivnykiv na robochych mistsiakh*. Dnipro: Zhurfond. (in Ukrainian)
2. Godovska, T., T., & Feshchenko, V. (2011). The criteria of index of influence on agrarian and ecological system of urban ore in the city of Zhytomyr. *Bulletin of ZhNAEU*, 1(1), 400-408. (in Ukrainian)
3. *Polihony tverdykh pobutovykh vidkhodiv. Osnovni polozhennia proektuvannia. Zmina № 1 ta Zmina № 2, 100 DBN V.2.4-2-2005* (2020). (in Ukrainian)
4. Zhuk, H., & Predun, K. (2018). Ecological Aspects of the Biogas Usage from Disposal Sites of Solid Domestic Waste for The Energy Supplyneedsof Ukrainian Residential Areas. *Ventilation, lighting and heat and gas supply*, 26, 69-74. DOI: <https://doi.org/10.32347/2409-2606.2018.26> (in Ukrainian)
5. Orlova, T. O. (2008). *Otsinky ekolohichnoho stanu zemelnykh dilianok, zainiatykh vidkhodamy ta ob'ektamy povodzhennia z nymy* (PhD dissertation). Kyiv: KNUCA. (in Ukrainian)
6. Radovenchuk, V. M., & Homelia, M. D. (2010). *Tverdi vidkhody: zbir, pererobka, skladuvannia*. Kyiv: Kondor. (in Ukrainian)
7. Satin, I. V., & Kutsyi, D. V. (2024). Greenhouse gas emissions from municipal waste disposal sites and measures for its reduction. *Scientific Reports of the National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine*, 3(109), 1-31. DOI: [https://doi.org/10.31548/dopovidi.3\(109\).2024.003](https://doi.org/10.31548/dopovidi.3(109).2024.003) (in Ukrainian)
8. Biliaiev, M. M., & Kharytonov, M. M. (2011). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *Air Pollution Modeling and Its Application XXI*, 87-91. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15 (in English)
9. Ilić, P., Ilić, S., & Stojanović Bjelić, L. (2018). Hazard Modelling of Accidental Release Chlorine Gas Using Modern Tool-Aloha Software. *Quality of Life (Banja Luka) - APEIRON*, 16(1-2), 38-45. DOI: <https://doi.org/10.7251/qol1801038i> (in English)
10. Ngusale, G., Oloko, M., Kabok, P., Otiende, F., & Ngusale, G. (2021). Estimation of methane and landfill gas emission from an open dump site. *International Journal of Environment and Waste Management*, 28(3), 317-327. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJEW.2021.118368> (in English)
11. Trung, T. D. B., Tri, D. Q. (2022). Application of the AERMOD Model to Evaluate the Health Benefits Due to Air Pollution from the Public Transport Sector in Ha Noi, Viet Nam. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 10, 13-33. DOI: <https://doi.org/10.4236/gep.2022.103002> (in English)

Надійшла до редколегії: 03.02.2025

Прийнята до друку: 09.06.2025