

Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору
Національна академія наук України

Кваліфікаційна наукова праця на
правах рукопису

ШЕВЧУК ОЛЕКСАНДР ВІКТОРОВИЧ

УДК 504.054+504.06:528.88

ДИСЕРТАЦІЯ

**ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА ГЕОМОНІТОРИНГУ РАЙОНІВ
ВПЛИВУ ПОЛІГОНІВ ЗАХОРОНЕННЯ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ
ВІДХОДІВ**

122 – «Комп'ютерні науки»

Подається на здобуття наукового ступеню доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



О. В. Шевчук

Науковий керівник:

Триснюк Василь Миколайович,
доктор технічних наук, професор;

Азімов Олександр Тельманович,
доктор геологічних наук, старший
науковий співробітник.

Київ – 2025

АНОТАЦІЯ

Шевчук О.В. Інформаційна система геомоніторингу районів впливу полігонів захоронення твердих побутових відходів – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття ступеня доктора філософії за фахом 122 «Комп'ютерні науки» – Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору. Національної академії наук України, Київ – 2025.

У дисертаційній роботі вирішено наукове завдання, розроблення інформаційно-аналітичної системи моніторингу екологічного впливу полігонів твердих побутових відходів із застосуванням сучасних інформаційних технологій: геоінформаційних систем, дистанційного зондування Землі, автоматизованого аналізу даних і цифрового моделювання. Інтеграція цих інструментів дозволила забезпечити високоточне оцінювання екологічного стану територій, прогнозування ризиків і обґрунтування рішень щодо мінімізації впливу полігонів на довкілля.

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, та зв'язок з актуальним напрямом науково-технічної політики України, сформульовані мета та задачі досліджень, розкрито наукову новизну та практичну цінність роботи, представлено її загальну характеристику.

У **першому розділі** дисертаційної роботи здійснено комплексний аналіз нормативно-правових основ організації системи управління твердими побутовими відходами в Україні, визначено роль і перспективи використання інформаційних технологій у процесах екологічного моніторингу полігонів ТПВ. Особливу увагу приділено розвитку геоінформаційних систем, дистанційного зондування Землі, безпілотних технологій та їх інтеграції у системи екологічної безпеки. Проаналізовано міжнародний досвід, зокрема стратегії країн ЄС у сфері поводження з відходами, і визначено ключові напрями вдосконалення вітчизняних підходів із застосуванням цифрових технологій. Наведено сучасні підходи до моніторингу стану сміттєзвалищ та полігонів, що базуються на

безконтактних та контактних методах отримання екологічної інформації. Розділ підкреслює важливість переходу до використання інформаційно-аналітичних платформ для підтримки прийняття рішень у сфері поводження з відходами в Україні.

У другому розділі розглядаються методологічні основи побудови інтегрованої системи управління полігоном твердих побутових відходів з використанням даних дистанційного зондування Землі та геоінформаційних систем. Описано алгоритми знімання полігонів за допомогою безпілотних літальних апаратів та технології створення ортофотопланів і цифрових моделей рельєфу, що дозволяють здійснювати точний просторовий аналіз та визначення об'ємів сміттєвих тіл. Представлено результати експериментальних досліджень Здолбунівського полігону твердих побутових відходів, порівняння різних методів побудови цифрових моделей (TIN та GRID), їх точнісні характеристики та вплив на обчислення об'ємів. Запропоновано рекомендації щодо організації геоінформаційного моніторингу в активний період експлуатації полігонів, включаючи моніторинг температурних режимів, біогазу та фільтрату. Використання супутникових та геоінформаційних систем технологій значно підвищує ефективність екологічного контролю полігонів, забезпечує можливість візуалізації змін та прийняття обґрунтованих рішень для мінімізації негативного впливу на довкілля.

У третьому розділі розглянуто інформаційну технологію моделювання екологічних процесів на Здолбунівському полігоні твердих побутових відходів. Основна увага приділена інтеграції геоінформаційних систем, технологій дистанційного зондування Землі, автоматизованого аналізу екологічних даних і цифрового моделювання для моніторингу впливу полігону на компоненти довкілля – ґрунти, водні ресурси, атмосферу та біорізноманіття. Представлено методику використання даних супутникового моніторингу для оцінки змін геометричних характеристик полігону, здійснення температурного картографування та виявлення потенційних зон екологічної небезпеки. Особлива увага приділяється аналізу ролі інформаційних технологій у мінімізації

негативних наслідків діяльності полігону, впровадженні заходів щодо реабілітації територій, оптимізації будівництва нових полігонів та створенні цифрових екологічних платформ для оперативного управління ризиками. Інформаційні технології розглядаються як ключовий елемент системного підходу до екологічного моніторингу, прогнозування та управління сталим розвитком територій із підвищеним техногенним навантаженням.

У четвертому розділі обґрунтовано концепцію створення та удосконалення інформаційно-аналітичної системи моніторингу для території Здолбунівського полігону побутових відходів. Враховуючи високі екологічні ризики та складність техногенного навантаження, в роботі сформульовано стратегічні завдання моніторингу довкілля, серед яких визначено необхідність спостереження за геодинамічними процесами, якістю ґрунтів, поверхневих і підземних вод, станом промислових відходів та екзогенних змін рельєфу. Розроблено структуру інформаційно-аналітичної системи моніторингу, яка включає модулі збору, обробки, аналізу, візуалізації даних та підтримки прийняття рішень. У дослідженні розкрито важливість інтеграції геоінформаційних систем (QGIS), впровадження сенсорних технологій і застосування сучасних підходів до прогнозування екологічних ризиків, зокрема з використанням методів математичного моделювання та машинного навчання. Розділ містить обґрунтування етапів створення інформаційно-аналітичної системи моніторингу, аналіз потенційних ризиків її функціонування та пропозиції щодо інтеграції цифрових рішень у систему логістики збору і сортування побутових відходів на основі технологій Інтернету речей (IoT) і RFID-ідентифікації. Запропонована система сприятиме підвищенню ефективності управління екологічною безпекою полігону та прилеглих територій, дозволяючи оперативно реагувати на зміни стану довкілля та розробляти науково обґрунтовані заходи з його захисту.

Ключові слова: інформаційні технології, інтегрованої системи управління, геоінформаційні системи, інформаційно-аналітичне забезпечення, програмне забезпечення, полігон побутових відходів, управління екологічною безпекою, спектральні канали, цифрове моделювання.

ANNOTATION

Shevchuk O.V. Information System for Geo-Monitoring of Municipal Solid Waste Landfill Impact Zones – Qualification research manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 122 "Computer Science" – Institute of Telecommunications and Global Information Space, National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv – 2025.

The dissertation addresses the scientific problem of developing an information-analytical system for monitoring the environmental impact of municipal solid waste (MSW) landfills using modern information technologies: geographic information systems (GIS), remote sensing (RS) of the Earth, automated data analysis, and digital modeling. The integration of these tools has enabled highly accurate assessments of the environmental condition of territories, risk forecasting, and substantiation of decisions aimed at minimizing the impact of landfills on the environment.

The introduction substantiates the relevance of the study and its connection with the current direction of Ukraine's scientific and technical policy, formulates the research goals and objectives, reveals the scientific novelty and practical value of the work, and presents its general characteristics.

The first chapter of the dissertation provides a comprehensive analysis of the regulatory and legal framework for organizing the MSW management system in Ukraine, defines the role and prospects of using information technologies in the processes of environmental monitoring of MSW landfills. Special attention is paid to the development of GIS, RS, unmanned technologies, and their integration into environmental safety systems. International experience, particularly EU waste management strategies, is analyzed, and key directions for improving domestic approaches using digital technologies are identified. Modern approaches to monitoring the condition of landfills and dumpsites based on contactless and contact methods of obtaining environmental information are presented. The chapter emphasizes the importance of transitioning to the use of information-analytical platforms to support decision-making in the field of waste management in Ukraine.

The second chapter considers the methodological foundations for building an integrated MSW landfill management system using Earth remote sensing and GIS data. It describes the algorithms for landfill imaging using unmanned aerial vehicles (UAVs) and technologies for creating orthophoto maps and digital elevation models (DEM), which allow accurate spatial analysis and calculation of waste body volumes. The chapter presents the results of experimental research on the Zdolbuniv MSW landfill, comparing different methods for building digital models (TIN and GRID), their accuracy characteristics, and their impact on volume calculations. Recommendations are proposed for organizing GIS-based monitoring during the active operational period of landfills, including monitoring of temperature regimes, biogas, and leachate. The use of satellite and GIS technologies significantly enhances the effectiveness of environmental control of landfills, enables visualization of changes, and supports informed decisions for minimizing environmental impact.

The third chapter examines the information technology for modeling environmental processes at the Zdolbuniv MSW landfill. It focuses on the integration of GIS, RS technologies, automated environmental data analysis, and digital modeling to monitor the landfill's impact on environmental components – soils, water resources, atmosphere, and biodiversity. A methodology for using satellite monitoring data to assess changes in the geometric characteristics of the landfill, perform thermal mapping, and identify potential ecological hazard zones is presented. Special attention is given to the role of information technologies in minimizing the negative consequences of landfill operations, implementing rehabilitation measures, optimizing the construction of new landfills, and creating digital environmental platforms for operational risk management. Information technologies are considered a key element of a systemic approach to environmental monitoring, forecasting, and sustainable development management in areas with increased technogenic pressure.

The fourth chapter substantiates the concept of creating and improving an information-analytical monitoring system for the Zdolbuniv MSW landfill area. Given the high environmental risks and complexity of the technogenic load, the study formulates strategic environmental monitoring tasks, including the need to observe

geodynamic processes, soil quality, surface and groundwater, industrial waste conditions, and exogenous relief changes. The structure of the information-analytical monitoring system is developed, including modules for data collection, processing, analysis, visualization, and decision support. The importance of integrating GIS (QGIS), implementing sensor technologies, and applying modern approaches to environmental risk forecasting, including mathematical modeling and machine learning methods, is disclosed. The chapter justifies the stages of creating the information-analytical monitoring system, analyzes potential operational risks, and provides suggestions for integrating digital solutions into the logistics system of household waste collection and sorting based on the Internet of Things (IoT) and RFID identification technologies. The proposed system will improve the effectiveness of environmental safety management for the landfill and adjacent territories, allowing prompt response to environmental changes and the development of scientifically grounded protection measures.

Keywords: information technologies, integrated management system, geographic information systems, information-analytical support, software, municipal solid waste landfill, environmental safety management, spectral bands, digital modeling.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

I. Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації.

Статті у наукових фахових виданнях України.

1. Шевчук О.В. Інформаційні технології екологічного моніторингу сміттєзвалищ із застосуванням дистанційно пілотованих літальних апаратів. Екологічна безпека та природокористування. 2025. Випуск 1 (53). С. 164-172. <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2025.1.164-172>.

2. Шевчук О.В., Триснюк В.М., Математична модель тепловізійного моніторингу полігону твердих побутових відходів та його температурне картографування за даними дистанційного зондування Землі. Системи озброєння та військова техніка. 2024. № 4 (80). С. 121-125. DOI: 10.30748/soivt.2024.80.15.

3. Триснюк Т.В., Шевчук О.В. Геоінформаційні технології температурного картографування сміттєзвалищ за даними дистанційного зондування землі. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2025. № 1 (86). С. 161-166. DOI: 10.31673/2412-4338.2025.014063.

Статті у виданнях, індексованих у наукометричних базах.

1. Azimov O.T., Shevchuk O.V. Geoinformation systems in monitoring studies of environmental pollution factors in the areas of municipal solid waste landfills. 19th EAGE Int. Conf. on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects (11-14 May 2020, Kyiv, Ukraine): Conference Proceedings. Vol. 2020. P. 1–7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo111>

2. Azimov O.T., Shevchuk O.V. (2020) Modeling and forecasting the impact of solid waste landfill on groundwater (the landfill in Zdolbuniv district of Rivne region, Ukraine, as an example). Conference Proceedings, XIV International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the

Environment”, Nov 2020, Volume 2020, p. 1 – 6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056078>

3. Azimov, O.T., Shevchuk, O.V., Azimova, K.O., Dorofey, Ye.M. and Tomchenko, O.V. (2020). Integration of GIS and RSE aiming to the effective monitoring of the surroundings of landfills. Ukrainian J. Remote Sens., 27, 4–12. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2020.27.183>

4. O. Shevchuk . A. Andreiev, O. Azimov, O. Tomchenko. Geoinformation technology of temperature mapping of dumps based on remote sensing of the Earth. XVI International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment» 15-18 November 2022, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580117>

5. O. Shevchuk. Implementation of the system of environmental monitoring of dumps by using unmanned aerial vehicles.. XVI International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment» 15-18 November 2022, Kyiv, Ukraine. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2022580118>

6. Shevchuk O.V., Azimov O.T., Tomchenko O.V. Remote sensing monitoring of the landfill sites as a factor of adverse environmental impact [Електронний ресурс]. 20th EAGE Int. Conf. on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects (11-14 May 2021, Kyiv, Ukraine): Proc. Vol. 2021. P. 1–7 <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521054>

II. Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

7. Азімов О.Т., Шевчук О.В. Впровадження сучасних ДЗЗ/ГІС-технологій з метою моніторингу чинників негативного екологічного впливу на довкілля полігонів захоронення відходів. Колективна монограф. за матеріалами ХІХ Міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: тенденції 2020 року» (Київ, 06-07 жовт. 2020 р.). За заг. ред. С.О.

Довгого. К.: ТОВ «Вид-во «Юстон», 2020. С. 63–65. https://itgip.org/wp-content/uploads/2020/10/zbirka_2020_1.pdf

8.Шевчук О.В., Азімов О.Т. Аналіз даних системи гідрогеологічного моніторингу районів впливу полігонів твердих побутових відходів: моделювання та прогнозування. 6-й Міжнар. молодіжний конгрес «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування»: Зб. матеріалів (Львів, 09-10 лютого 2021 р.). Львів: ТзОВ «ЗУКЦ», 2021. С. 250. DOI: 10.23939/book.ecocongress.2021.

9.Шевчук О.В., Азімов О.Т. Впровадження системи екологічного моніторингу сміттєзвалищ шляхом використання безпілотних літальних апаратів / Колективна монограф. за матеріалами 20-ї Міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: виклики 2021 року» (м. Київ, 04-08 жовт. 2021 р.); За заг. ред. С.О. Довгого. Київ: ТОВ «Вид-во «Юстон», 2021. С. 117–121. https://itgip.org/wp-content/uploads/2021/10/1_zbirka_2021.pdf

10.Шевчук О.В., Азімов О.Т. Застосування ДЗЗ/ГІС-технологій для моніторингу місць захоронення відходів. Int. Sci. and Practical Conf. «Science, engineering and technologies: Current issues and research» (March 12–13 2021, Prague, The Czech Republic). Prague: Izdevnieciba «Baltija Publishing», 2021. Р. 62–66. http://dspace.puet.edu.ua/bitstream/123456789/10756/1/conf_CTU_tech_%D0%9C%D0%B0%D1%80%D1%82_2021%20%281%29.pdf

11.Шевчук О.В., Азімов О.Т. Моніторинг Здолбунівського сміттєзвалища ТПВ (Рівненська область, Україна) із застосуванням безпілотного літального апарату / Колективна монограф. за матеріалами 20-ї Міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: виклики 2021 року» (м. Київ, 04-08 жовт. 2021 р.); За заг. ред. С.О. Довгого. Київ: ТОВ «Вид-во «Юстон», 2021. С. 121–126. https://itgip.org/wp-content/uploads/2021/10/1_zbirka_2021.pdf

12. Шевчук О.В., Азімов О.Т. Сутність геоінформаційного моніторингу полігонів твердих побутових відходів // Інноваційні технології: Матеріали XVI наук.-техн. конф. студентів, аспірантів, докторантів та молодих учених (м. Київ, 20-21 листоп. 2019 р.). За заг. ред. Бабікової К.О., Мельничук Л.М. – К.: ІНТЛ НАУ, 2019. – С. 288–293.

13. Шевчук О. В., Томченко О. В., Андреев А. А., Азімов О. Т. Температурне картографування ландшафтів у районах сміттєзвалищ за різночасовими даними космічних зйомок // Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток : колективна монографія за матеріалами XXI Міжнар. наук.- практ. конф. (14-16 листоп. 2022 р.) / НАН України, ІТГП, НЦАКДЗ ІГН, ВНТУ ; за ред. С. О. Довгого. – Київ: Юстон, 2022. – С. 167-169. https://itgip.org/wp-content/uploads/2022/11/tezy_57.pdf

14. Азімов О.Т., Злобіна К.С., Кармазиненко С.П., Кураєва І.В., Шевчук О.В. Моніторинг техногенного навантаження на водойми районів захоронення твердих побутових відходів (на прикладі Київського полігона № 5). Перші практичні дії та проблемні питання реалізації Закону України «Про управління відходами»: зб. матеріалів Нац. форуму «Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології» (м. Івано-Франківськ, 21-23 листоп. 2023 р.). Київ: Центр екол. освіти та інформації, 2023. С. 268–272. ISBN 978-617-7130-22-1. <https://drive.google.com/file/d/1J-SorpNwbgr6JlkKWsQlvftKklZJnZAR/view?usp=sharing>

15. Азімов О.Т., Томченко О.В., Шевчук О.В. Аерокосмічний аспект просторово-часового аналізу змін в екосистемах районів захоронення побутових відходів / Колективна монограф. за матеріалами 21-ї Міжнар. наук.-практ. конф. «Інформаційно-комунікаційні технології та сталий розвиток» (Київ, 14-16 листоп. 2022 р.). За заг. ред. С.О. Довгого. Київ: ТОВ «Вид-во «Юстон», 2022. С. 159–161. Режим доступу: https://itgip.org/wp-content/uploads/2022/11/tezy_53.pdf

16. Шевчук О.В., Курило А.В. Створення регіональної системи комплексного моніторингу сміттєзвалищ. Збірник матеріалів: XXIII Міжнародна науково-практична конференція «Математичне моделювання та інформаційно-

комунікаційні технології для перемоги та відновлення», Київ, 12-13 листопада 2024 р. https://itgip.org/wp-content/uploads/2024/11/2024-11-24_zbirka_all_07_11_2024_148x210.pdf

III. Наукові праці, які додатково відображають результати дисертації.

17. Азімов О.Т., Томченко О.В., Шевчук О.В. Аналіз просторово-часових змін в екосистемах районів сміттєзвалищ муніципальних відходів з застосуванням дистанційних і ГІС-даних // Екологічна безпека та технології захисту довкілля. – 2021. – № 3. – С. 17–21. http://npchornobyl.com.ua/wp-content/uploads/2022/06/N3_2021.pdf

18. Азімов О.Т., Шевчук О.В., Азімова К.О. Геоінформаційні системи в дослідженні чинників забруднення довкілля територій сміттєзвалищ: стан та перспективи / Геоінформатика.2020. №2. с.69-88. URL: <http://www.geology.com.ua/>

19. Азімов О. Т., Томченко О. В. , Шевчук О. В. Просторово-часовий аналіз змін в екосистемах районів локалізації муніципальних відходів із застосуванням ГІС і даних дистанційних знімачь. // Український географічний журнал. – 2024. – № 2. – С. 51–60. <https://doi.org/10.15407/ugz2024.02.051>

Наукові впровадження.

1. «Методична рекомендація стосовно запровадження комплексу геоінформаційного забезпечення досліджень і робіт щодо поводження з геологічним середовищем, як субстратом локалізації твердих побутових відходів». Автори О.Т. Азімов, О.В. Шевчук. Впроваджено Державним закладом «Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління» спільно з Інститутом телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України, Державною установою «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук».

2. «Методична рекомендація щодо застосування результатів аналізу просторово-часових змін в екосистемах району Здовбицького сміттєзвалища муніципальних відходів (Здолбунівський район Рівненської області) з застосуванням дистанційних і ГІС-даних». Автори О.Т. Азімов, О.В. Томченко, О.В. Шевчук. Впроваджено Міністерством розвитку громад та територій України спільно з Інститутом телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України, Державною установою «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук».

ЗМІСТ

	ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	18
	ВСТУП.....	19
РОЗДІЛ 1	АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПОЛІГОНІВ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ.....	26
1.1	Нормативно-правові основи організації системи управління твердими побутовими відходами.....	26
1.1.1	Загальна характеристика законодавства України, щодо побутових відходів.....	26
1.1.2	Європейська стратегія в сфері поводження з відходами.....	33
1.2	Використання геоінформаційних технологій для екологічного моніторингу.....	39
1.2.1	Сучасні проблеми використання інформаційних ресурсів за станом сміттєзвалищ.....	39
1.2.2	Безконтактні методи інформаційної структури системи моніторингу побутових відходів	42
1.2.3	Контактні методи	47
1.3	Стратегія та стан поводження з твердими побутовими відходами в Україні та світі	56
	ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....	65
РОЗДІЛ 2	МОДЕЛЬ ПОБУДОВИ ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ ПОЛІГОНУ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ НА ОСНОВІ ДЗЗ-ГІС ТЕХНОЛОГІЙ	67
2.1	Методика визначення об'єму полігону твердих побутових відходів з використанням архівних картографічних матеріалів та матеріалів аерознімання.....	67
2.1.1	Польові та камеральні роботи при аерознімання полігону твердих побутових відходів із використанням БПЛА.....	67
2.1.2	Створення ортофотоплану та ЦМР.....	73

2.2	Теоретичні та експериментальні дослідження Здолбунівського полігону з використанням TIN-моделей.....	79
2.2.1	Створення топографічного плану полігону твердих побутових відходів комбінованим методом.....	79
2.2.2	Польові та камеральні роботи при аерознімання полігону із використанням БПЛА TRIMBLE UX-5.....	80
2.3	Моніторингові дослідження в активний період функціонування полігонів ТПВ	88
2.3.1	Моніторинг захоронення твердих побутових відходів.....	88
2.3.2	Моніторинг температурних режимів. Іншим важливим етапом є моніторинг температурних режимів	89
2.3.3	Моніторинг утворення біогазу та фільтрату.....	90
2.4	Моніторинг ґрунтів на полігоні твердих побутових відходів.....	91
2.4.1	Відбір та підготовка проб ґрунту для аналізу.....	91
2.4.2	Визначення рухомих форм нітрит-іонів у ґрунті за умов накопичення на його поверхні ТПВ.....	93
	Висновки до розділу 2.....	96
РОЗДІЛ 3 ГЕОІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЗДОДБУНІВСЬКОГО ПОЛІГОНУ		97
3.1	Інформаційні технології аналізу впливу на довкілля Здолбунівського полігону побутових відходів.....	98
3.1.1	Використання інформаційних технологій для моніторингу та контролю забруднення ґрунтів.....	98
3.1.2	Роль інформаційних технологій у контролі впливу на водні ресурси.....	100
3.1.3	Роль інформаційних технологій у контролі впливу на атмосферу.....	104
3.1.4	Моделювання екологічних процесів Здолбунівського полігону у ГІС-середовищі ландшафтів та біорізноманіття.....	106

3.2	Інтегровані технології будівництва полігону твердих побутових відходів	108
3.2.1	Проектування полігонів ТПВ в Україні на основі інформаційних технологій	108
3.2.2	Етапи проектування будівництва полігону твердих побутових відходів.....	109
3.3	Дистанційні методи екологічного моніторингу сміттєзвалищ муніципальних відходів.....	112
3.4	Геоінформаційна технологія температурного картографування сміттєзвалищ за даними дистанційного зондування	115
3.5	Передумови впровадження геоінформаційних технологій для екологічного моніторингу полігонів ТПВ: досвід України та міжнародна практика.....	120
	Висновки до розділу 3.....	124
РОЗДІЛ 4	УДОСКОНАЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПОЛІГОНУ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ.....	125
4.1	Інформаційно-аналітична система моніторингу території Здолбунівського полігону побутових відходів	125
4.1.1	Основні стратегічні завдання контролю й моніторингу.....	125
4.1.2	Архітектура та проектування геоінформаційної системи.....	129
4.1.3	Етапи просторового аналізу та візуалізації даних.....	132
4.2	Інформаційно-аналітичні платформи логістичного процесу сортування відходів.	136
4.2.1	Потенційні ризики інформаційно-аналітичної системи.....	136
4.2.2	Впровадження сучасних цифрових рішень логістичного процесу сортування відходів.....	137
4.2.3	Технології Інтернету речей у системі сортування побутових відходів.....	139

4.3	Інформаційний аналіз оцінювання рівня екологічної безпеки території досліджень	140
4.4	Метод вимірювання концентрації реорганізованих речовин на сміттєзвалищах.....	143
4.5	Структура Інформаційно-аналітичної системи моніторингу (ІАСМ) Здолбунівського полігону побутових відходів.....	144
	Висновки до розділу 4.....	147
	Висновки.....	149
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	151
	ДОДАТОК А. Акт впровадження.....	161
	ДОДАТОК Б. Акт впровадження.....	162

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

БПЛА – безпілотний літальний апарат;

ДБН – державні будівельні норми;

ДЗЗ – дистанційне зондування Землі;

ГНСС – глобальна навігаційна супутникова система;

ГІС – геоінформаційна система;

НЛС – наземне лазерне сканування;

ІАСМ – інформаційно-аналітична система моніторингу;

ІТ – інформаційні технології;

СКП – середня квадратична похибка;

ТПВ – тверді побутові відходи;

ЦМР – цифрова модель рельєфу.

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Становлення інформаційних технологій, як базового стратегічного ресурсу визначає якісно новий рівень геомоніторингу полігонів твердих побутових відходів (ТПВ). Їх застосування забезпечує підвищення точності оцінки екологічних ризиків, оптимізацію системи управління та перехід до прогнозного моделювання екологічних процесів. Інтеграція геоінформаційних систем (ГІС), дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), автоматизованих сенсорних мереж і технологій безпілотного моніторингу створює основу для формування комплексної цифрової платформи сталого управління відходами в Україні. Незважаючи на трансформаційні процеси, проблема поводження з ТПВ в Україні залишається надзвичайно актуальною. Зростання обсягів утворення відходів, недосконалість діючої інфраструктури полігонів, їх неналежне розміщення та експлуатація призводять до масштабного забруднення ґрунтів, водних ресурсів і атмосферного повітря, становлячи реальну загрозу для здоров'я населення та стабільності екосистем. Системне впровадження інформаційних технологій в екологічний менеджмент є ключовою умовою модернізації сфери поводження з відходами відповідно до стандартів Європейського Союзу та вимог національної стратегії сталого розвитку.

Теоретично-методичні підходи щодо інформаційних технологій в екологічних аспектах поводження з відходами розроблялися у працях українських та зарубіжних учених. Зокрема, серед українських дослідників варто відзначити праці О. Ф. Балацького, І. К. Бистрякова, П. П. Борщевського, С. І. Дорогунцова, В. О. Лимаренка, В. С. Міщенко, Л. Г. Мельника, В. Я. Шевчука та інших, які розглядали питання інтеграції інформаційних технологій у системи екологічного моніторингу та управління твердими побутовими відходами. Г. Г. Гелетука та З. А. Марценюк досліджували застосування біоенергетичних технологій та цифрових інструментів для підвищення ефективності полігонного господарства. Серед світових науковців вагомими є роботи В. Wilson, D. Wilson, A. Christensen, G. Tchobanoglous та J. Pichtel, які заклали концептуальні основи цифрового супроводу процесів поводження з відходами, використовуючи геоінформаційні

системи (ГІС), дистанційне зондування Землі (ДЗЗ), штучний інтелект та автоматизовані системи екологічного моніторингу. Їхні підходи впроваджено у практиці багатьох країн ЄС, а також США і Канади, де управління полігонами базується на системах раннього виявлення екологічних ризиків через супутникові платформи.

В останні роки набули розвитку такі напрями, як використання супутникових даних високої роздільної здатності (Sentinel-2, Landsat-8, платформа Copernicus), інтеграція результатів аерофотозйомки з безпілотних літальних апаратів (БПЛА), застосування машинного навчання та нейронних мереж для аналізу екологічних трендів. Зокрема, Європейське агентство з навколишнього середовища (ЕЕА) активно впроваджує аналітичні моделі на основі Big Data для моніторингу полігонів та оцінки змін у довкіллі. Використання хмарних обчислювальних платформ, таких як Google Earth Engine, дозволяє обробляти великі обсяги супутникової інформації в реальному часі для виявлення ознак деградації ґрунтів, змін водних ресурсів та накопичення забруднюючих речовин.

Аналіз наявної літератури і міжнародного досвіду свідчить про те, що нині особливої актуальності набуває створення єдиних інтегрованих цифрових систем екологічного моніторингу полігонів побутових відходів. Це передбачає застосування мультидатових даних ДЗЗ, геоінформаційного аналізу, технологій штучного інтелекту та автоматизованого прогностного моделювання для оцінки та запобігання екологічним ризикам. Водночас у вітчизняній науковій практиці поки що недостатньо розроблені комплексні підходи до інтеграції таких технологій у системи управління полігонами ТПВ, особливо в контексті постконфліктної відбудови та адаптації до стандартів Європейського Союзу. Це обумовлює потребу в подальших дослідженнях, спрямованих на вдосконалення математичних моделей, алгоритмів обробки екологічної інформації та практичних механізмів впровадження геоінформаційних технологій у систему поводження з побутовими відходами в Україні.

Актуальність обраного напрямку обумовлена необхідністю розробки єдиних методичних підходів і алгоритмів оцінювання впливу полігонів ТПВ на

навколишнє середовище із залученням сучасних технологічних рішень, що особливо важливо у контексті післявоєнного відновлення України та інтеграції до європейського правового простору.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення єдиної системи моделей та методів обробки інформації щодо забруднення місцевості в автоматизованій системі екологічного контролю районів впливу полігонів захоронення твердих побутових відходів для уточнення прогнозних оцінок і підтримки прийняття рішень.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

- аналіз сучасного стану геоекологічного моніторингу полігонів ТПВ;
- розроблення математичної моделі регіональної інтегрованої системи управління побутовими відходами;
- дослідження екологічного впливу Здолбунівського полігону ТПВ на прилеглі території;
- створення алгоритмів побудови інформаційної технології моніторингу з використанням ГІС і ДЗЗ;
- удосконалення методів сортування і обробки побутових відходів на регіональному рівні;
- формування технічних рішень для впровадження інтегрованої системи екологічної безпеки на основі цифрового моніторингу.

Об'єктом дослідження є екологічні процеси інформаційно-комунікаційних технологій, щодо забруднення навколишнього середовища в результаті функціонування полігонів захоронення твердих побутових відходів.

Предметом дослідження є моделі, алгоритми та інформаційні технології моніторингу, прогнозування і підтримки управлінських рішень у сфері екологічної безпеки полігонів ТПВ.

Методи дослідження. У процесі дослідження застосовувалися системний підхід, методи теоретичного аналізу, математичного моделювання, геоінформаційного аналізу просторових даних, методи дистанційного зондування Землі, а також методи автоматизованої обробки екологічної інформації. Основу

методології становить застосування інформаційних технологій для збору, інтеграції, обробки та візуалізації даних щодо стану навколишнього середовища у зонах впливу полігонів ТПВ. Використано методи аналізу даних великих обсягів (Big Data), машинного навчання для виявлення закономірностей поширення забруднюючих речовин, просторового моделювання у середовищі ГІС та дистанційного моніторингу із залученням даних супутникової зйомки й БПЛА.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Наукові результати дисертації отримані в межах програми науково-дослідних робіт на базі Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України та реалізовані у співпраці з Міністерством розвитку громад та територій України на протязі 2020-2025 років.

Наукові результати дисертації отримані в межах програми науково-дослідних робіт на базі Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України та реалізовані у тематиках: «Розробка засобів інформаційно-аналітичної підтримки завдань забезпечення стійкості об'єктів критичної інфраструктури в регіональній соціоекосистемі за умов зростання природних, техногенних і соціальних загроз» (№ ДР 0121U109216), «Розробка обчислювальних технологій та методів моделювання для дослідження нестационарних процесів.» (№ РК 0116U000793 державної реєстрації) «Розробка інформаційної технології моделювання і прогнозування розвитку соціально-еколого-економічних систем в умовах невизначеності, нестационарності та ризику» (№ ДР 0121U100132).

«Розробка та аналіз засобів теоретико-ігрового моделювання стратегій збалансованого технологічного розвитку територій» (№ РК 0116U000796 державної реєстрації); в межах науково-дослідної роботи «Дослідження асиміляційного потенціалу поверхневих вод, геологічного середовища та приземної атмосфери в умовах техногенезу» (№ ДР 0113U004982)., Закону України «Про основні засади (стратегію) державної економічної політики України на період до 2030 р.», програми Європейської «Зеленої угоди». Наукова новизна одержаних результатів.

Удосконалено математичну модель регіональної інтегрованої системи управління побутовими відходами на основі методів обробки просторово-екологічних даних у ГІС-середовищі.

Вперше здійснено комплексний аналіз забруднення ґрунтів у зоні впливу полігону Здовбицького ТПВ із використанням методів дистанційного зондування та рентгенофлуоресцентного аналізу.

Вперше розроблено інформаційну технологію багат шарового моніторингу стану водних ресурсів, що передбачає інтеграцію результатів натурних вимірювань, супутникових знімків та геоінформаційних баз даних.

Удосконалено підходи до цифрового моделювання температурного режиму сміттєзвалищ за даними дистанційного зондування із застосуванням Google Earth Engine та інструментів теплової спектрометрії.

Набула подальшого розвитку методика оцінки точності визначення об'єму полігону твердих побутових відходів з використанням БПЛА на основі автоматизованого аналізу мультисенсорних екологічних даних.

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробленні та удосконаленні існуючих і нових інформаційних технологій передачі даних для адаптивного управління і моніторингу сміттєзвалищ.

Запропоновані в дослідженні методики, рекомендації та технологічні рішення можуть знайти практичне застосування у діяльності органів виконавчої влади та місцевого самоврядування в межах формування та реалізації стратегічних програм управління побутовими відходами, розроблення планів сталого соціально-економічного розвитку територій, запровадження заходів із захисту довкілля й забезпечення екологічної безпеки населення. Крім того, ці розробки можуть бути ефективно використані фахівцями житлово-комунального господарства, працівниками комунальних та приватних підприємств, що здійснюють експлуатацію полігонів твердих побутових відходів, а також науково-дослідними й проектними установами. Зокрема, вони є актуальними на етапі проектування окремих елементів полігонної інфраструктури, у фазі активної експлуатації для оптимізації процесів захоронення та продовження строку

функціонування полігону, під час оцінювання потенціалу генерації теплової енергії та отримання біогазу, а також для планування заходів з рекультивації та стабілізації техногенно навантажених ділянок. Запропоновані алгоритми можуть бути легко інтегровані в систему управління на рівні органів місцевої влади, що сприятиме підвищенню ефективності природоохоронних рішень, зменшенню екологічних ризиків та забезпеченню збалансованого розвитку муніципальних утворень.

Практичну цінність утворюють наукові результати дисертації, а також розроблені першочергові заходи зі стабілізації полігонів ТПВ.

Результати аналізу просторово-часових змін в екосистемах району Здовбицького сміттєзвалища муніципальних відходів (Здолбунівський район Рівненської області) з застосуванням дистанційних і ГІС-даних» використано в діяльності Директорату просторового планування територій та архітектури Міністерства розвитку громад та територій України (Акт впровадження-приймання-передачі матеріалів науково-дослідних розробок від 21.10.2022 р.) (Додаток Б);

Результати дисертаційної роботи використовуються в «Державній екологічній академії післядипломної освіти та управління» (Додаток А);

Особистий внесок дисертанта полягає в розробленні теоретичних та практичних дослідженнях, ситематизації роботи та узагальненні результатів наукових досліджень.

Апробація матеріалів дисертації. Одержані результати наукового дослідження були представлені та обговорені на міжнародних конференціях: ІХ, ХХ, ХХІ, ХХІІ, ХХІІІ Міжнародна науково-практична конференція Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАНУ (м. Київ, Україна, 2020, 2021, 2022, 2023, 2024); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми екологічної безпеки» (м. Кременчук, Україна, 2018), The 2nd JESSD Symposium (School of Environmental Science, Друга міжнародна науково-практична конференція «Екологія. Ресурси. Енергія» (Київ, 2021).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 22 наукові роботи. З них 3– у наукових фахових виданнях, 3 статті, що додатково відображають результати досліджень, 6 статей у конференціях наукометричній базі «SCOPUS», 10 тез доповідей у наукових конференціях та 2 впровадження результатів наукового дослідження.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел з 73 найменувань, додатків; містить 35 рисунків і 8 таблиць. Загальний обсяг роботи становить 162 сторінки, серед яких 125 сторінок основного тексту.

РОЗДІЛ І. АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПОЛІГОНІВ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

Перший розділ присвячено аналізу основних складових інформаційної системи геомоніторингу полігонів твердих побутових відходів. Розглянуто нормативно-правові основи організації системи управління ТПВ в Україні та проведено порівняльний аналіз із законодавством ЄС, що дозволило окреслити прогалини та перспективи гармонізації правового поля у сфері відходів. Детально досліджено можливості застосування геоінформаційних технологій (ГІС), дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) та безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для екологічного моніторингу сміттєзвалищ, що є основою побудови сучасних інформаційно-аналітичних систем підтримки прийняття рішень. Проаналізовано сучасний стан поводження з ТПВ в Україні та світі, із фокусом на використання цифрових рішень для підвищення ефективності управління відходами та мінімізації екологічних ризиків. Окреслено основні проблеми галузі та окреслено напрями інтеграції інформаційних технологій для їх розв'язання.

1.1. Нормативно-правові основи організації системи управління твердими побутовими відходами

1.1.1. Загальна характеристика законодавства України, щодо побутових відходів. В Україні нормативно-правова база, створена для врегулювання правових відносин у сфері поводження з ТПВ, включає такі основні закони та підзаконні акти:

1. Закон України «Про відходи» (від 05.03.1998 р., з подальшими доповненнями).
2. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» (від 25.06.1991 р., з подальшими доповненнями).
3. Закон України «Про забезпечення санітарного й епідемічного благополуччя населення» (від 24.02.1994 р., з подальшими доповненнями).

Незважаючи на те, що проблема ТПВ є соціально більш значущою, ніж проблема відходів промислового виробництва, на даний момент існує законодавча

прогалина: Закон України «Про відходи» не забезпечує ефективної системи поводження з ними тому, що не передбачає чіткого механізму вирішення проблеми ТПВ, зокрема шляхом впровадження сучасних ефективних технологій поводження з ТПВ. Крім того, органи влади на місцях не повною мірою його виконують. З огляду на це Держжитлокомунгоспом спільно з Міністерством економіки та Міністерством охорони навколишнього природного середовища запланована розробка проекту закону «Про побутові відходи». Очікується, що законопроект включатиме механізм вирішення проблеми твердих побутових відходів шляхом впровадження сучасних економічно ефективних технологій поводження з ТПВ, стимулювання залучення інвестицій і, відповідно, зменшення бюджетних витрат у цій сфері та оптимізації експлуатаційних витрат на послуги, пов'язані з санітарною очисткою населених пунктів [16].

Сам Закон України «Про відходи» був прийнятий та опублікований в 1998 році, після видання закон підпав під правки у 2002 році, зокрема найбільшу увагу в яких було приділено питанню поводження з небезпечними класами відходів. На державному та місцевому рівнях законодавство про відходи доповнюється місцевими та регіональними планами поводження з відходами та рішеннями міських та державних органів, які включають норми щодо збору, переробки та утилізації відходів.

Чинним Законом України «Про відходи» передбачено низку правопорушень, за які накладається дисциплінарна, адміністративна, цивільно-правова або кримінальна відповідальність. Зокрема, Кодексом України про адміністративні правопорушення передбачена адміністративна відповідальність у цій галузі. А саме: порушення правил утворення, зберігання, розміщення, транспортування, утилізації, ліквідації та використання відходів тягне за собою накладання штрафу на громадян від 1 до 5 неоподатковуваних мінімумів – і від 5 до 8 неоподатковуваних мінімумів доходів – на посадових осіб. Приховування, викривлення або відмова в наданні повної та достовірної інформації на запити посадових осіб і звернення громадян та їхніх об'єднань щодо безпеки утворення

відходів і поводження з ними карається накладанням на посадових осіб штрафу в обсязі від 3 до 5 неоподатковуваних прибуткових мінімумів.

Відповідно до ст. 37 Закону України «Про відходи», яка має назву «Контроль і нагляд у сфері поводження з відходами», державний контроль і нагляд здійснюють спеціально вповноважений центральний орган виконавчої влади в сфері поводження з відходами (Міністерство охорони навколишнього природного середовища України) або інші спеціально вповноважені органи виконавчої влади. Нагляд за дотриманням законів у сфері поводження з відходами здійснює Генеральний прокурор України та підпорядковані йому органи прокуратури в межах повноважень, передбачених законом. Громадський контроль у сфері поводження з відходами здійснюють громадські інспектори з охорони навколишнього природного середовища відповідно до чинного законодавства [16].

Держжитлокомунгосп розробив, а Кабінет Міністрів України Постановою № 265 від 04.03.2004 року затвердив, «Програму поводження з твердими побутовими відходами в Україні», яка викладає напрямки розвитку української системи поводження з ТПВ на період 2005–2011 роки. Ця програма сформувала базис для розробки Національної стратегії поводження з твердими побутовими відходами в Україні, яка доповнює Програму та містить всебічну схему розвитку систем поводження з ТПВ в Україні в довгостроковій перспективі.

Кабінет Міністрів України Постановою № 915 від 26.07.2001 року «Про впровадження системи збирання, сортування, транспортування, переробки та утилізації відходів як вторинної сировини» затвердив пропозицію щодо перетворення державної компанії з переробки та утилізації використаної тари й упаковки «Укртарапереробка» в державну компанію «Укрекокомресурси» та затвердив тарифи на послуги із збирання, сортування, перевезення, переробки та утилізації використаної тари.

«Національна стратегія поводження з твердими побутовими відходами в Україні» була розроблена Держжитлокомунгоспом та данською консультаційною компанією COWI в співробітництві з українськими експертами. Фінансувало розробку Стратегії Данське агентство охорони навколишнього середовища.

Основна мета Національної стратегії поводження з ТПВ в Україні полягає в зменшенні обсягів утворення та негативного впливу всіх видів твердих побутових відходів, а, відповідно, в забезпеченні стабільного розвитку, чистоти українських міст та здоров'я населення. Стратегія сприятиме створенню адекватного підходу до розвитку та покращання системи поводження з ТПВ в Україні. Завдяки встановленню узгодженого порядку денного стратегія зробить певний внесок у інтеграцію та координацію діяльності зацікавлених сторін, і, таким чином, сприятиме ефективному використанню всіх наявних ресурсів.

Регіональна програма охорони навколишнього природного середовища та раціонального використання природних ресурсів на 2003–2011 роки (від 18.04.2003 р.). Дана програма базується на ідеї сталого розвитку – узгодженні між економічним та соціальним розвитком суспільства і збереженням довкілля, який передбачає першочергові заходи з будівництва полігонів ТПВ для районних центрів і сміттєпереробного заводу у кожному регіоні.

Державні будівельні норми України «Полігони твердих побутових відходів» ДБН В. 2.4–2–2005. Норми поширюються на проектування нового будівництва, реконструкцію, технічне переоснащення й рекультивацію полігонів твердих побутових відходів. Норми є обов'язковими для застосування органами державного управління і нагляду, замовниками (інвесторами), проектними організаціями, підрядниками, іншими юридичними і фізичними особами – суб'єктами підприємницької діяльності у будівництві незалежно від форм власності.

Накази Міністерства будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України «Про затвердження Правил експлуатації полігонів твердих побутових відходів» від 04.03.04 р. № 265, який встановлює порядок улаштування, утримання та експлуатації полігонів твердих побутових відходів (КТМ 204 Україна 019–96); 10.01.06 № 7 «Норми утворення твердих побутових відходів у населених пунктах України», який регламентує кількісні показники споживання послуг із вивезення та утилізації твердих побутових відходів; 10.01.06 № 3 «Про затвердження санітарно-технічного паспорта полігону твердих побутових відходів

(типового)», який впорядковує галузевий контроль за санітарно-технічним станом полігонів ТПВ та ін. [10].

Крім загальнодержавних законів, постанов, нормативних актів на місцевому рівні обласною та міською радою приймаються ряд нормативних актів, в тому числі і з охорони довкілля тощо. Сюди варто додати Закон України «Про місцеве самоврядування в Україні», де передбачаються повноваження місцевих органів влади у галузі інтегрованого управління та поводження з твердими побутовими відходами.

Екологічний контроль за всіма видами господарської діяльності в системі поводження з відходами здійснюють на основі Законів України «Про охорону навколишнього природного середовища» і «Про відходи» територіальні органи Міністерства екології та природних ресурсів, що здійснюють державний контроль, а також екологічні служби підприємств, організацій і установ, що здійснюють виробничий контроль.

Екологічний контроль включає: аналіз існуючих виробництв із метою виявлення можливостей і способів зменшення кількості і ступеня небезпеки відходів, що утворюються, а також перевірку порядку і правил обігу з ними; перевірку виконання планів заходів щодо впровадження маловідхідних технологічних процесів, технологій використання і знешкодження відходів, лімітів розміщення відходів; визначення маси розміщуваних відходів відповідно до виданих дозволів; перевірку ефективності природоохоронних заходів і безпеки експлуатованих об'єктів розміщення відходів для навколишнього середовища і здоров'я населення за інформацією про процеси, що відбуваються в місцях розміщення відходів.

Служба виробничого екологічного контролю погоджує із територіальними органами Міністерства екології та природних ресурсів місця і періодичність відбору проб для проведення інструментальних досліджень, перелік контрольованих показників, застосовувані методики проведення аналізів, об'єм і порядок подання інформації про розміщення відходів.

Територіальні органи Міністерства екології та природних ресурсів здійснюють державний контроль за природоохоронною діяльністю відповідно до розроблених планів робіт, а також при виникненні аварійних ситуацій, різкому погіршенні екологічної обстановки і за сигналами громадян і організацій.

Законодавство України у сфері поводження з ТПВ зазнало значних змін, спрямованих на вдосконалення системи управління відходами та наближення її до європейських стандартів. Проте, незважаючи на ці зусилля, існують певні прогалини та виклики, які потребують подальшого вирішення. Закон України «Про відходи» визначає основні правові, організаційні та економічні засади діяльності, пов'язаної із запобіганням або зменшенням обсягів утворення відходів, їх збиранням, перевезенням, зберіганням, сортуванням, обробленням, утилізацією та видаленням, а також з відверненням негативного впливу відходів на навколишнє природне середовище та здоров'я людини. Проте, на практиці реалізація положень цього закону стикається з низкою проблем.

Однією з основних проблем є недостатня ефективність системи поводження з ТПВ. Закон не передбачає чіткого механізму вирішення проблеми ТПВ, зокрема шляхом впровадження сучасних ефективних технологій поводження з відходами. Крім того, органи влади на місцях не завжди повною мірою виконують вимоги законодавства, що призводить до порушення норм екологічної безпеки та санітарних стандартів. У відповідь на ці виклики, у 2017 році Кабінет Міністрів України затвердив Національну стратегію управління відходами в Україні до 2030 року. Метою цієї стратегії є створення умов для підвищення стандартів життя населення шляхом впровадження системного підходу до поводження з відходами, зменшення обсягів утворення відходів, збільшення обсягів їх переробки та повторного використання.

Стратегія передбачає створення до 2030 року 800 нових потужностей із переробки вторинної сировини, утилізації та компостування біовідходів, зменшення загального обсягу захоронення побутових відходів з 95% до 30%, мінімізацію загального обсягу відходів, що захоронюються, з 50% до 35%, а також

створення мережі з 50 регіональних полігонів, які відповідатимуть вимогам 31-ої Директиви ЄС.

Однак, реалізація стратегії стикається з низкою викликів, серед яких: недостатній рівень фінансування, відсутність належної інфраструктури для збору та переробки відходів, низький рівень екологічної свідомості населення, а також відсутність ефективного механізму контролю за виконанням вимог законодавства.

З метою вирішення цих проблем, 9 липня 2023 року набув чинності Закон України «Про управління відходами», який запускає реформу управління відходами та наближає національне законодавство до законодавства ЄС. Цей закон передбачає нову дієву дозвільну систему, децентралізацію управління відходами, багаторівневе планування, розбудову інфраструктури, а також впровадження європейських принципів – ієрархії управління відходами, розширеної відповідальності виробника, принципу «забруднювач платить».

Закон також передбачає створення інформаційної системи управління відходами, яка дозволить забезпечити прозорість та контроль за всіма етапами поводження з відходами – від їх утворення до утилізації або захоронення. Це сприятиме виведенню з тіні сфери управління відходами та залученню інвестицій у цю галузь.Мінприроди України

Крім того, закон встановлює чіткі правила співпраці органів місцевого самоврядування, інвесторів, переробних підприємств, виробників продукції та товарів, що дозволяє надавати якісні та доступні послуги у сфері управління відходами. Також передбачено впровадження системи розширеної відповідальності виробника, яка заохочує бізнес до мінімізації утворення відходів та зацікавленості в їх переробці.

Таким чином, прийняття та впровадження Закону України «Про управління відходами» є важливим кроком на шляху до створення ефективної системи управління відходами, яка відповідає європейським стандартам та забезпечує екологічну безпеку населення. Проте, для досягнення поставлених цілей необхідно забезпечити належне фінансування, розбудову інфраструктури,

підвищення рівня екологічної свідомості населення, а також ефективний контроль за виконанням вимог законодавства.

1.1.2. Європейська стратегія в сфері поводження з відходами. Особливу увагу слід приділити директивам Європейського Союзу, які стосуються сфери поводження з відходами та згруповані в чотири основні категорії. Однією з ключових є Директива 75/442/ЄЕС, яка виконує функцію загальної правової основи (рамкової директиви) для всієї політики ЄС у сфері відходів. Вона встановлює базові вимоги та підходи до управління всіма типами відходів, за винятком тих, що регулюються окремими спеціалізованими нормативними актами [10]. Доповненням до рамкового законодавства є також Директива, що регламентує поводження з небезпечними відходами. У ній визначаються специфічні вимоги до збирання, зберігання, обробки, утилізації та остаточного видалення відходів, які мають небезпечні властивості (рис. 1.1.).

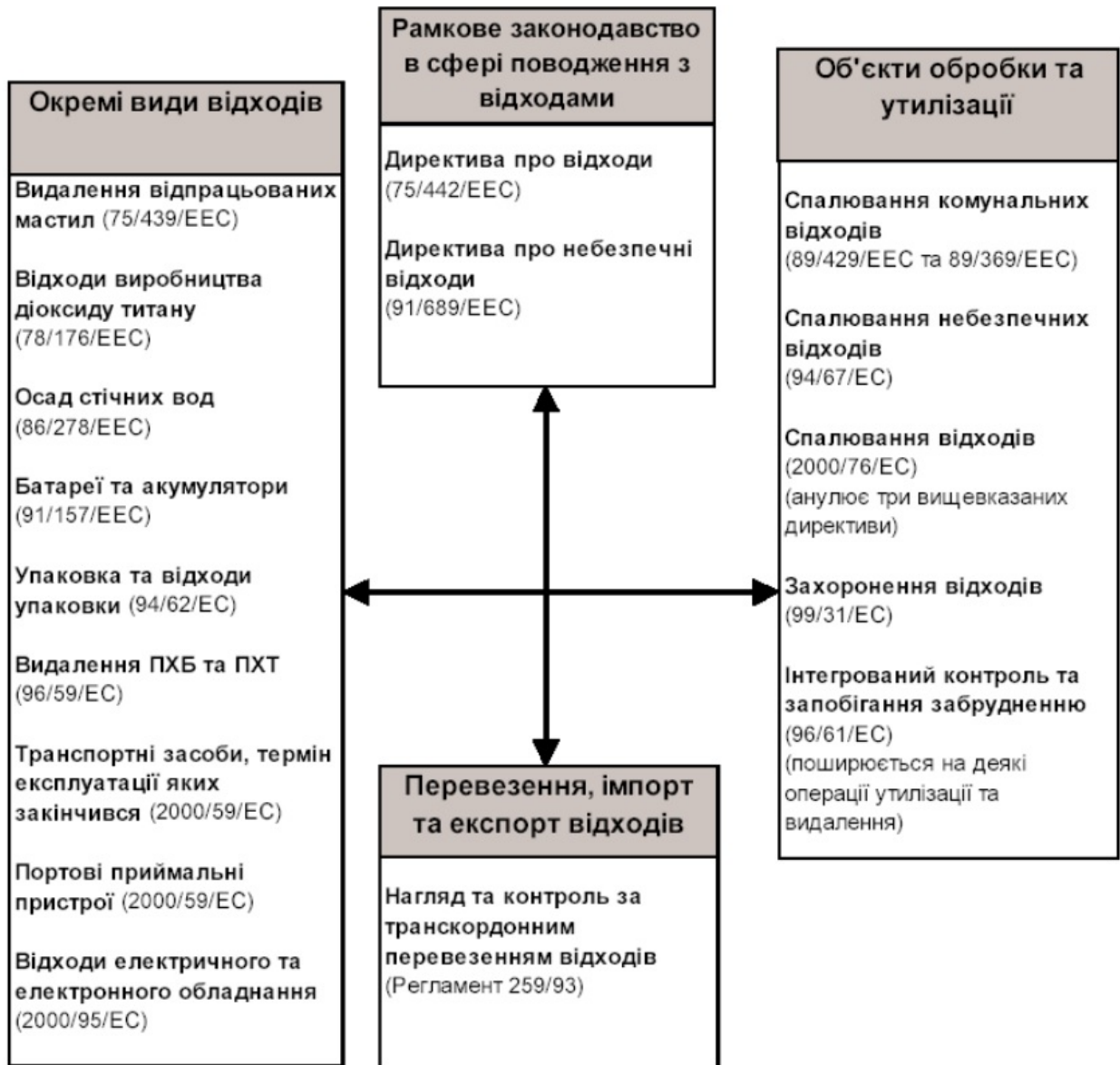


Рисунок 1.1. Схематичне зображення законодавства ЄС в сфері поводження з відходами

Проведення порівняльного аналізу законодавчих підходів до регулювання поводження з твердими побутовими відходами в Україні та за кордоном свідчить про суттєві розбіжності як у термінології, так і в загальній правовій структурі. Зокрема, український «Закон про відходи» містить перелік визначень, що охоплюють основні види діяльності, пов'язані з відходами — такі як збирання, зберігання, транспортування, обробка, утилізація та видалення. Однак, вітчизняні терміни й підходи мають низку відмінностей у порівнянні з поняттями, закріпленими у «Рамковій директиві про відходи» Європейського Союзу.

Найбільш яскравим прикладом таких відмінностей є різне тлумачення самого базового поняття — «відходи». У законодавстві України цей термін трактується інакше, ніж у європейському праві, що створює правову невизначеність, особливо в контексті міжнародного співробітництва або гармонізації екологічної політики. Крім того, українське визначення не узгоджується з нормами Базельської конвенції — одного з ключових міжнародних документів, що регламентує транскордонне переміщення небезпечних відходів та їх видалення. З метою демонстрації зазначених розбіжностей нижче наводиться порівняльна таблиця термінів.

Таблиця 1.1. Порівняльна таблиця термінів

Закон України «Про відходи»	Базельська конвенція	Рамкова Директива ЄС
будь-які речовини, матеріали і предмети, що утворюються у процесі людської діяльності і не мають подальшого використання за місцем утворення чи виявлення та яких їх власник повинен позбутися шляхом утилізації чи видалення	речовини або предмети, які видаляються, є наміри щодо їх видалення, або повинні бути видалені	будь-яка речовина або предмет, які власник викидає, має намір викинути, або повинен викинути

Класифікація відходів у Європейському Союзі здійснюється на основі вимог відповідних директив, зокрема Директиви 2008/98/ЄС, яка встановлює рамкову структуру для поводження з усіма категоріями відходів. Відповідно до неї, усі відходи, що утворюються внаслідок щоденної діяльності домогосподарств, а також відходи з подібними характеристиками та складом, класифікуються як «побутові відходи». У разі, якщо певний вид відходів підпадає під умови, визначені у Директиві ЄС про небезпечні відходи, та має відповідні фізико-хімічні характеристики (вибухонебезпечність, токсичність, корозійність тощо), він

включається до категорії «небезпечні відходи». Всі інші відходи, які не відповідають критеріям небезпечності, відносяться до групи «умовно безпечних» або «не небезпечних». Особливу групу становлять «інертні відходи» — матеріали, що не піддаються фізичним, хімічним або біологічним перетворенням у навколишньому середовищі. Вони не горять, не розкладаються, не вступають у реакції з іншими речовинами й не утворюють нових токсичних сполук, які могли б негативно впливати на довкілля чи здоров'я людини [10].

Згідно з положеннями директив, відходи, незалежно від категорії, повинні відповідати екологічним критеріям, серед яких – низький рівень вимивання забруднювальних речовин, мінімальна екотоксичність фільтрату, а також відсутність ризику для якості підземних і поверхневих вод. Для впорядкування класифікації різних типів відходів на практиці складаються спеціальні таблиці, що враховують склад, походження, характеристики та ступінь небезпеки.

В українському законодавстві, зокрема у Законі України «Про відходи», застосовується подібна термінологія. Визначення таких категорій, як «побутові відходи» та «небезпечні відходи», широко використовуються в нормативно-правовій базі. Небезпечні відходи, згідно з вітчизняною класифікацією, розподіляються за чотирма категоріями залежно від рівня небезпеки: від надзвичайно небезпечних до тих, що мають низьку ступінь ризику. Водночас, такі терміни як «інертні відходи» або «вторинна сировина» застосовуються без чітко визначеного правового статусу, що відрізняє їх від підходів, прийнятих у Європейському Союзі. Зокрема, в європейській практиці термін «вторинна сировина» взагалі не виділяється окремо: об'єкти вважаються або відходами, або продуктами, відповідно до чого на них поширюються окремі регулювання.

Одним із важливих аспектів, який чітко регламентується європейським законодавством, є контроль за утворенням і міграцією звалищного газу. В ЄС передбачено обов'язковий збір біогазу з усіх полігонів, де захоронюються біологічно розкладані відходи. Цей газ повинен бути не лише зібраний, але й оброблений та за можливості використаний у якості вторинного енергетичного ресурсу [10]. Українська нормативна база передбачає лише часткові заходи в

цьому напрямі. Зокрема, чинні нормативи вимагають облаштування систем дегазації на полігонах ТПВ, однак не містять обов'язкових вимог щодо подальшої утилізації або енергетичного використання отриманого біогазу [15]. Обробка біогазу згадується лише в контексті рекомендацій під час проектування нових полігонів, що свідчить про відсутність системного підходу до реалізації принципів циркулярної економіки.

Ще однією відмінністю є відсутність у національному законодавстві чітко встановлених цільових показників з переробки та зменшення утворення певних категорій відходів, як це передбачено директивами ЄС. Зокрема, в Україні не встановлено нормативів щодо зменшення обсягів упаковки, рівня переробки електричного та електронного обладнання, а також специфічних вимог до утилізації промислових та небезпечних фракцій. У той час як у Європейському Союзі ці цілі закріплені на законодавчому рівні й періодично переглядаються відповідно до стратегії ЄС з розвитку зеленої економіки та досягнення кліматичних цілей, в Україні лише окремі програмні документи містять подібні орієнтири без обов'язкового виконання.

Таким чином, хоча національне законодавство в окремих положеннях гармонізоване з європейськими стандартами, існує потреба в його суттєвому оновленні з метою підвищення екологічної ефективності, впровадження економічних стимулів до переробки та забезпечення прозорості екологічного контролю за поводженням із ТПВ.

Продовжуючи аналіз, варто наголосити, що адаптація українського законодавства до вимог Європейського Союзу у сфері поводження з твердими побутовими відходами (ТПВ) потребує не лише формального приведення нормативно-правових актів у відповідність до європейських, але й реального впровадження дієвих механізмів, що забезпечують ефективність реалізації положень на практиці. Одним із найбільш суттєвих бар'єрів залишається повільна імплементація європейських підходів у сфері поводження з відходами на регіональному та місцевому рівнях, зокрема через недостатню координацію між органами виконавчої влади та місцевого самоврядування. Це створює прогалини

в організаційній структурі управління відходами, послаблює відповідальність за результати і гальмує впровадження стратегій замкнутого циклу та принципів циркулярної економіки.

Водночас необхідно зауважити, що чинна система державного екологічного контролю не здатна ефективно реагувати на новітні виклики у сфері утилізації та переробки ТПВ, що пов'язано як із відсутністю сучасного технічного оснащення, так і з браком кваліфікованих кадрів. Законодавча система, хоча і формально охоплює ключові напрями управління відходами, все ще орієнтована переважно на декларативний підхід без достатньої підтримки з боку економічних стимулів або санкційних важелів для забезпечення належного виконання норм. На практиці це означає відсутність дієвих механізмів контролю за порушеннями у сфері поводження з відходами, що унеможлиблює формування відповідального ставлення суб'єктів господарювання до проблеми накопичення, переробки та утилізації ТПВ.

Варто підкреслити й брак синергії між екологічною, соціальною та економічною політикою, зокрема в аспекті управління потоками побутових відходів. Існуючі програми не враховують повною мірою екосистемний підхід, інтеграцію принципів «забруднювач платить» та «розширеної відповідальності виробника», які є ключовими у європейській моделі. Доцільним є запровадження чітких нормативів зменшення утворення відходів, а також розвитку інфраструктури для їх роздільного збирання, компостування, механіко-біологічної переробки та енергетичної утилізації, які відповідали б міжнародним стандартам і практикам.

Також потрібно наголосити на важливості розробки та реалізації комплексної системи громадського моніторингу у сфері поводження з відходами. Така система могла б забезпечити зворотний зв'язок між населенням, органами управління та суб'єктами господарювання, підвищити прозорість процесів і сприяти поширенню екологічної культури. Поширення інформаційних технологій, цифрових платформ для моніторингу, аналізу та візуалізації даних щодо

управління відходами, включно з геоінформаційними системами, відкриває нові можливості для підвищення ефективності державної політики в цій сфері.

Таким чином, незважаючи на формальні кроки з адаптації українського законодавства до європейських стандартів, необхідним залишається створення дієвого інституційного середовища, яке забезпечить не лише відповідність нормативно-правової бази вимогам ЄС, а й реальне зниження негативного впливу ТПВ на довкілля і здоров'я населення, за рахунок впровадження сучасних безвідходних технологій та системної трансформації підходів до управління відходами.

1.2. Використання геоінформаційних технологій для екологічного моніторингу

1.2.1. Сучасні проблеми використання інформаційних ресурсів за станом сміттєзвалищ. Продовжуючи аналіз, варто наголосити, що адаптація українського законодавства до вимог Європейського Союзу у сфері поводження з твердими побутовими відходами (ТПВ) потребує не лише формального приведення нормативно-правових актів у відповідність до європейських, але й реального впровадження дієвих механізмів, що забезпечують ефективність реалізації положень на практиці. Одним із найбільш суттєвих бар'єрів залишається повільна імплементація європейських підходів у сфері поводження з відходами на регіональному та місцевому рівнях, зокрема через недостатню координацію між органами виконавчої влади та місцевого самоврядування. Це створює прогалини в організаційній структурі управління відходами, послаблює відповідальність за результати і гальмує впровадження стратегій замкнутого циклу та принципів циркулярної економіки.

Водночас необхідно зауважити, що чинна система державного екологічного контролю не здатна ефективно реагувати на новітні виклики у сфері утилізації та переробки ТПВ, що пов'язано як із відсутністю сучасного технічного оснащення, так і з браком кваліфікованих кадрів. Законодавча система, хоча і формально охоплює ключові напрями управління відходами, все ще орієнтована переважно

на декларативний підхід без достатньої підтримки з боку економічних стимулів або санкційних важелів для забезпечення належного виконання норм. На практиці це означає відсутність дієвих механізмів контролю за порушеннями у сфері поводження з відходами, що унеможлиблює формування відповідального ставлення суб'єктів господарювання до проблеми накопичення, переробки та утилізації ТПВ.

Варто підкреслити й брак синергії між екологічною, соціальною та економічною політикою, зокрема в аспекті управління потоками побутових відходів. Існуючі програми не враховують повною мірою екосистемний підхід, інтеграцію принципів «забруднювач платить» та «розширеної відповідальності виробника», які є ключовими у європейській моделі. Доцільним є запровадження чітких нормативів зменшення утворення відходів, а також розвитку інфраструктури для їх роздільного збирання, компостування, механіко-біологічної переробки та енергетичної утилізації, які відповідали б міжнародним стандартам і практикам.

Також потрібно наголосити на важливості розробки та реалізації комплексної системи громадського моніторингу у сфері поводження з відходами. Така система могла б забезпечити зворотний зв'язок між населенням, органами управління та суб'єктами господарювання, підвищити прозорість процесів і сприяти поширенню екологічної культури. Поширення інформаційних технологій, цифрових платформ для моніторингу, аналізу та візуалізації даних щодо управління відходами, включно з геоінформаційними системами, відкриває нові можливості для підвищення ефективності державної політики в цій сфері.

Таким чином, незважаючи на формальні кроки з адаптації українського законодавства до європейських стандартів, необхідним залишається створення дієвого інституційного середовища, яке забезпечить не лише відповідність нормативно-правової бази вимогам ЄС, а й реальне зниження негативного впливу ТПВ на довкілля і здоров'я населення, за рахунок впровадження сучасних безвідходних технологій та системної трансформації підходів до управління відходами.

Для дослідження параметрів об'єктів розміщення відходів в сучасних умовах застосовують наступні методи досліджень (рис 1.2.).

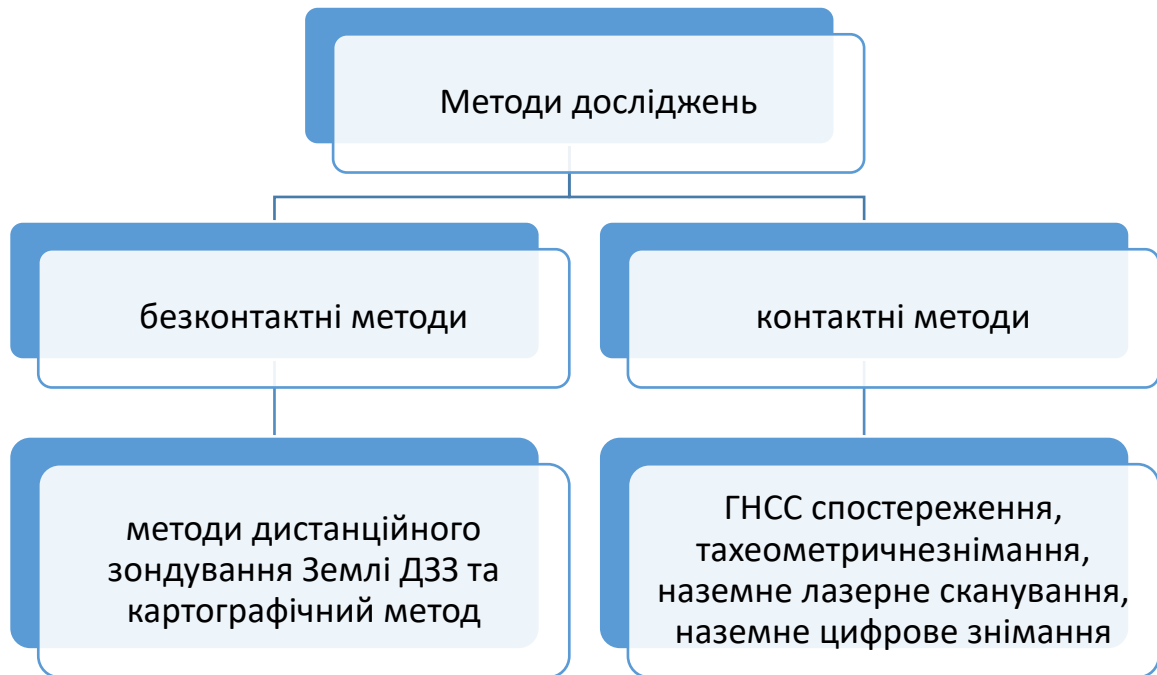


Рисунок 1.2. Методи досліджень параметрів об'єктів розміщення відходів

Поширеною сучасною практикою в управлінні твердими побутовими відходами є застосування геоінформаційних систем (ГІС) у поєднанні з іншими інструментами просторового аналізу для визначення найбільш придатних територій для розміщення полігонів та об'єктів утилізації відходів. Ефективність такого підходу полягає у можливості врахування великого спектра параметрів, зокрема екологічних обмежень (наявність водних об'єктів, захисних зон, зелених насаджень), геологічних умов (стабільність ґрунтів, гідрогеологічні особливості), географічних характеристик (доступність, транспортна логістика, віддаленість від населених пунктів) і чинних правових норм щодо охорони навколишнього природного середовища.

Вибір відповідних територій для складування або переробки побутових відходів має здійснюватися з урахуванням інтегрованих просторових даних. З цією метою у багатьох міжнародних дослідженнях ГІС-технології комбінуються з методами багатокритеріального аналізу (Multi-Criteria Decision Analysis – MCDA),

що дозволяє формувати комплексну оцінку придатності територій. Додатково використовуються дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), які забезпечують актуальну інформацію про стан територій, їхнє фактичне використання, типи покриття земної поверхні, а також зміни, що відбуваються у просторі та часі.

Серед визнаних міжнародних досліджень, які успішно поєднали використання ГІС та даних ДЗЗ для вирішення завдань, пов'язаних із оптимізацією розміщення об'єктів поводження з відходами, варто згадати роботи Аль-Ханбалі, Т. Басавараджапа, Б. Наса та Д. Ірхоуми. Вони демонструють ефективність просторового аналізу для екологічно безпечного планування полігонів. Значний внесок у розвиток цього напрямку зробили й дослідники С. Джоканович, Х. Шахабі, М. Сурешкумар та С. Ісса, які застосовують ГІС-аналітичні підходи в поєднанні з експертними оцінками, що дозволяє формувати науково обґрунтовані сценарії розміщення звалищ і полігонів.

Таким чином, застосування ГІС-технологій у поєднанні з даними ДЗЗ та аналітичними методами дозволяє створити ефективну систему підтримки прийняття рішень для вибору ділянок під сміттєзвалища, яка відповідає вимогам сталого розвитку, просторової безпеки та екологічної збалансованості.

1.2.2. Безконтактні методи інформаційної структури системи моніторингу побутових відходів. У контексті сучасного управління ТПВ широкого поширення набуває практика використання ГІС у поєднанні з інструментами просторового аналізу для визначення найбільш придатних територій під полігони захоронення, об'єкти переробки та логістичної інфраструктури. Такий підхід дозволяє забезпечити інтеграцію великої кількості просторових і атрибутивних даних, враховуючи екологічні, геоморфологічні, соціально-економічні та правові чинники. Зокрема, при плануванні місць для розміщення полігонів аналізуються такі параметри, як віддаленість від житлової забудови, наявність водних об'єктів і охоронних зон, гідрогеологічні особливості (зокрема рівень ґрунтових вод), інфраструктурна доступність (наявність доріг,

відстань до населених пунктів) і правові обмеження на використання територій [5].

Найбільш ефективними є підходи, що поєднують ГІС із методами багатокритеріального прийняття рішень (MCDA), а також із даними ДЗЗ, які забезпечують актуальну інформацію про рельєф, рослинний покрив, рівень деградації ландшафтів та динаміку антропогенного навантаження. Застосування таких підходів дозволяє не лише ідентифікувати потенційно безпечні території, а й оцінити ризики подальшого впливу полігонів на довкілля та населення.

В Україні подібні дослідження проводилися на прикладі окремих регіонів. Зокрема, у Рівненській області здійснено аналіз придатності територій для розміщення полігонів ТПВ із використанням ГІС-технологій, де було враховано понад 20 критеріїв впливу на довкілля та здоров'я населення [3]. У Житомирі впроваджено локальну геоінформаційну систему для планування маршрутів вивезення відходів та оптимізації їхнього збору. Ця система об'єднує картографічні шари з тематичними об'єктами (вулична мережа, місця збору сміття, наявність несанкціонованих звалищ) із алгоритмами розрахунку найкоротших маршрутів [4].

На Київщині дослідники використовували знімки супутників Sentinel-2 і Landsat для виявлення змін у конфігурації полігонів та моделювання зон можливого негативного впливу сміттєзвалищ на прилеглі території. При цьому було зафіксовано тенденцію до розширення площі полігонів та порушення санітарних зон, що дозволило обґрунтувати необхідність перегляду меж існуючих звалищ та посилення контролю за їхнім функціонуванням [4].

Іншим прикладом є використання ГІС для формування прогнозної карти місць потенційного виникнення несанкціонованих сміттєзвалищ у Київській області. Ю. Рябов на основі багатьох просторових змінних (відстані до доріг, житлової забудови, водойм, лісів) розробив модель, що дозволяє передбачати ймовірні зони стихійного накопичення ТПВ [5].

З огляду на вищезазначене, можна стверджувати, що ГІС-технології в поєднанні з ДЗЗ-даними формують потужну систему підтримки прийняття

управлінських рішень у сфері поводження з відходами. Вони дозволяють реалізувати принципи просторової сталості, мінімізувати екологічні ризики й оптимізувати використання природно-ресурсного потенціалу територій.

Застосування супутникових знімків для моніторингу полігонів ТПВ є одним з найефективніших інструментів у сфері дистанційного екологічного контролю, що дає змогу отримувати регулярні, масштабні та репрезентативні дані про динаміку сміттєзвалищ. Одним із перших прикладів використання космічного знімання для моніторингу полігону Аль-Курейн є дослідження А. Квартенга та А. Аль-Енезі, в якому було використано супутникові дані Landsat і IKONOS для визначення змін просторових характеристик полігону протягом 1972–2000 рр. Аналіз показав зростання температури поверхні полігону в порівнянні з навколишніми територіями, що свідчить про тепловий ефект накопичення відходів [2].

Подібний підхід застосували турецькі дослідники Д. Секер і С. Кая, які вивчали полігон ТПВ в Стамбульській агломерації на основі знімків IRS 1C PAN і IKONOS MS. Їм вдалося визначити зміни в площі та об'ємі полігону між 2000 і 2004 роками, а також створити цифрову модель рельєфу (ЦМР), яка стала основою для просторово-часового аналізу розвитку полігону.

У Китаї Л. Квінгшенг використав різночасові стереознімки для оцінки змін площі полігону ТПВ у місті Цзяочжоу, демонструючи можливість оперативного виявлення динамічних процесів зміни меж і структури сміттєзвалищ.

У масштабному дослідженні міської агломерації Дакка (Бангладеш) Деван А. проаналізував зміни за період 1960–2005 рр. і встановив, що урбанізація призвела до зменшення площ водно-болотних угідь, водних об'єктів та зелених зон. Паралельно спостерігалось збільшення площі полігонів ТПВ на 256% [47].

Стійка тенденція до зростання площ сміттєзвалищ та полігонів ТПВ також зафіксована у дослідженнях, виконаних за допомогою космічних знімків SAS PLANET. Так, у місті Алмати (Казахстан) протягом 2003–2016 рр. були відзначені зміни меж двох полігонів ТПВ, а також виявлено та закартографовано п'ять

несанкціонованих звалищ. Один з полігонів — Карасай — було виведено з експлуатації через його небезпечне розташування поблизу житлової зони.

Мультиспектральні та гіперспектральні космічні знімки відкривають додаткові можливості для аналізу впливу полігонів на довкілля. Зокрема, С. Манзо провів оцінку екологічного стану території поблизу Національного парку Везувій (Італія), де розташовано полігон ТПВ, за допомогою мультиспектральних знімків.

Моніторинг температурних змін на поверхні полігонів є ще одним напрямом використання супутникових даних. Так, К. Файсал встановив на основі знімків Landsat, що температура поверхні полігону Трейл Роуд (Канада) на 10 °С вища, ніж температура навколишнього середовища. Подібні результати також представлено у роботах С. Іакобоае та А. Шакера, що підтверджують важливість температурного моніторингу для оцінки стану сміттєзвалищ.

Головною перевагою супутникового моніторингу є можливість охоплення великих територій з високою періодичністю знімання. Наявність архівів супутникових зображень дозволяє аналізувати довготривалу динаміку змін полігонів ТПВ, зокрема з 1960-х років до теперішнього часу. Водночас існують і обмеження, серед яких: висока вартість високоточних знімків, потреба у спеціалізованому програмному забезпеченні, кваліфікованих фахівцях, а також обмеження щодо просторової роздільної здатності (0,5–3 м) та якості зображень за несприятливих погодних умов.

Незважаючи на ці виклики, застосування космічного знімання виводить систему моніторингу стану полігонів ТПВ на новий рівень, забезпечуючи об'єктивність, регулярність і доступність інформації, необхідної для екологічного управління, рекультивації земель і стратегічного планування інфраструктури поводження з відходами.

Окрему увагу слід приділити порівняльному аналізу різних методів знімання з точки зору ефективності, точності та вартості. Зокрема, при зіставленні даних, отриманих за допомогою БПЛА, з результатами лідарного та теодолітного знімання, встановлено, що БПЛА забезпечують схожу точність при значно

менших часових і фінансових затратах. Наприклад, дослідження, проведені у США, Канаді та Румунії, демонструють, що похибка висотної прив'язки ортофотопланів, отриманих з БПЛА, не перевищує 0,5 м, що є прийнятним для інженерно-екологічного моніторингу полігонів ТПВ. При цьому витрати часу на камеральну обробку скорочуються в рази у порівнянні з традиційними геодезичними методами, що дає можливість частіше повторювати знімання для отримання актуальних даних.

Ще однією перевагою використання БПЛА є можливість гнучкого планування польотних місій з урахуванням специфіки ділянки, що знімається, — рельєфу, перешкод, ліній електропередач, насаджень тощо. Крім того, БПЛА можуть бути обладнані мультиспектральними сенсорами, що дозволяє не лише аналізувати геометричні характеристики полігону, а й здійснювати оцінку стану рослинності, температурних аномалій, фільтратів, а також імовірного розповсюдження забруднень. Такі підходи вже реалізовано на практиці в дослідженнях полігонів у США, Австралії, Італії, де мультиспектральний аналіз допомагає не лише в моніторингу, а й у виявленні екологічно небезпечних зон на ранній стадії [27].

На сучасному етапі БПЛА розглядаються як ключовий елемент у формуванні інтегрованих систем екологічного моніторингу, де безпілотники слугують мобільним джерелом збору просторових і екологічних даних. Розвиток технологій глибокого навчання та комп'ютерного зору дозволяє автоматизувати аналіз отриманих знімків, здійснюючи автоматичне розпізнавання об'єктів (сміттєзвалища, техніка, контури полігонів), що вивільняє значний обсяг людських ресурсів і підвищує ефективність моніторингу. Відтак, інтелектуалізація БПЛА за допомогою алгоритмів машинного навчання сприятиме більш оперативному виявленню порушень, прогнозуванню навантаження на полігони, виявленню термічних аномалій і навіть прогнозу обсягів накопичення ТПВ.

У підсумку, можна стверджувати, що застосування БПЛА у сфері поводження з твердими побутовими відходами відкриває нові можливості для

побудови високоточних цифрових моделей рельєфу полігонів, формування тривимірних картографічних зображень, оцінки просторової динаміки та екологічного стану сміттєзвалищ. Високий рівень адаптивності до умов рельєфу, зручність повторного знімання, невисока вартість обладнання та програмного забезпечення дозволяють інтегрувати БПЛА як ефективний інструмент у державну систему екологічного моніторингу. Це, у свою чергу, є важливим кроком до підвищення рівня екологічної безпеки населених пунктів та реалізації стратегії сталого поводження з відходами.

1.2.3. Контактні методи. Траншейний метод. Для визначення об'єму накопичених відходів траншейний метод застосовують у виняткових випадках, здебільшого на невеликих полігонах або експериментальних майданчиках. Метод полягає у виокремленні визначеної ділянки полігону, на якій викопується траншея з фіксованими геометричними параметрами (глибина, ширина, довжина). Після фіксації початкових об'ємів траншея заповнюється побутовими відходами, а зміна її геометричних характеристик реєструється через певні проміжки часу. Це дозволяє визначити фактичну щільність відходів у реальних умовах полігону. Даний підхід дозволяє оцінити процеси ущільнення відходів під впливом власної ваги, зовнішніх навантажень та біохімічних процесів.

Попри простоту, траншейний метод має суттєві обмеження. Його застосування потребує виокремлення окремої ділянки, що зменшує корисну площу полігону, а також порушує нормальні технологічні цикли експлуатації. До того ж, такі роботи можуть становити небезпеку для персоналу з точки зору охорони праці. Траншейний метод не дає повної просторової картини всього полігону, а лише точкову локальну оцінку, що зменшує його ефективність для системного моніторингу. Водночас він залишається корисним для калібрування даних вагового методу чи уточнення параметрів ущільнення на початкових стадіях експлуатації полігону.

Контактні методи зйомки (ГНСС, НЛС, тахеометрія) забезпечують високу точність отримання просторових даних, однак потребують значного часу,

ресурсів і рівня безпеки при проведенні польових робіт. Вони доцільні для застосування на невеликих полігонах або у випадках, коли необхідна максимально точна інвентаризація геометричних параметрів. Натомість інструментальні методи, такі як БПЛА або космічне знімання, дозволяють виконувати оперативний моніторинг великих територій з мінімальним ризиком для персоналу. Тому у перспективі найбільш ефективною є інтеграція кількох методів з урахуванням їхніх сильних та слабких сторін. Наприклад, об'єднання БПЛА та ГНСС може забезпечити високу точність 3D-моделювання при збереженні безпеки та ефективності польових робіт. Крім того, отримані дані можуть бути інтегровані у ГІС, що значно розширює можливості просторового аналізу та прийняття управлінських рішень. (рис. 1.3.).

Застосування даного методу є доцільним переважно для територій з обмеженою площею, оскільки він не забезпечує ефективного захоронення великої кількості відходів. Це зумовлено необхідністю проведення значних обсягів земляних робіт для формування масштабних траншей, що, у свою чергу, істотно підвищує економічні витрати на реалізацію технології [11].



Рисунок 1.3. Траншейний спосіб захоронення відходів

Ваговий метод може бути застосований виключно на спеціально облаштованих полігонах ТПВ, де реалізовано відповідні інженерні заходи та встановлено автомобільні ваги для систематичного обліку маси доставлених відходів. Застосування цього методу на несанкціонованих або необлаштованих сміттєзвалищах є недоцільним, оскільки відсутність належної інфраструктури унеможливає забезпечення точності вимірювань. До основних недоліків вагового підходу слід віднести відносно низьку точність оцінювання об'ємів відходів, яка, за даними досліджень, становить 20–25 %.

Геофізичні методи дослідження. Характерною особливістю більшості об'єктів захоронення ТПВ є наявність металевих включень, вологи та значних концентрацій біогазу, що сприяє підвищенню електропровідності відходів порівняно з навколишніми ґрунтами та геологічними породами. Це створює передумови для ефективного застосування електричних або електромагнітних (ЕМ) геофізичних методів, які дозволяють надійно ідентифікувати межі тіл відходів, а також визначити їх глибину та товщину. Застосування зазначених методів є доцільним для просторового аналізу та неінвазивного картографування структури полігонів ТПВ (рис. 1.4).

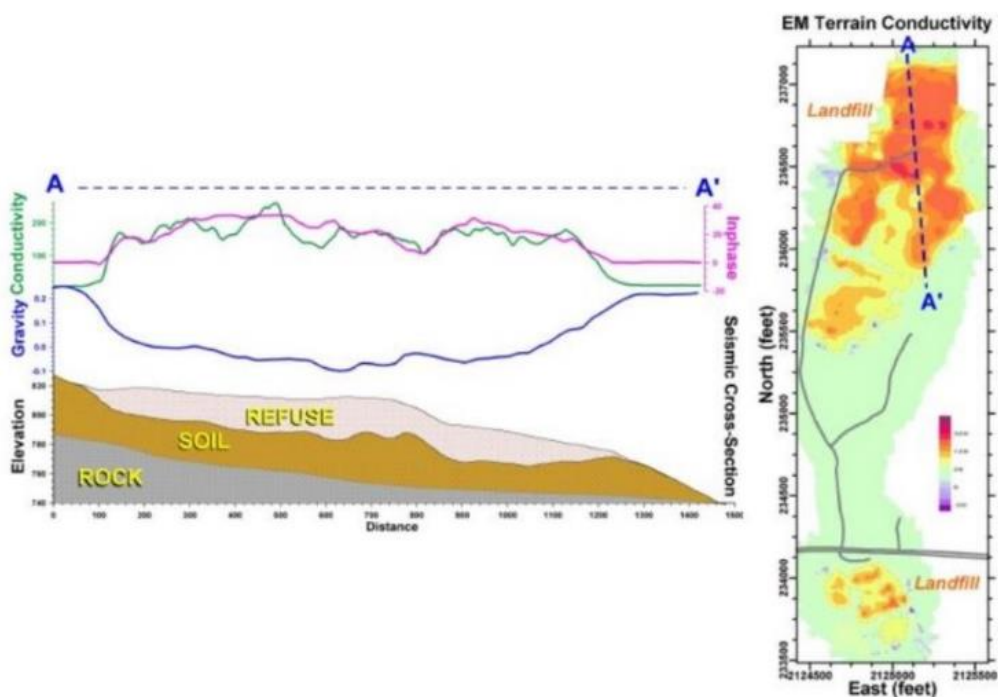


Рисунок 1.4. Геофізичні методи моніторингу

Можливість використання двох неінвазивних методів наземного геофізичного моніторингу – наземного проникаючого радара (GPR) та методу відбивної спектроскопії – була досліджена Д. Ферье. Такі методи виявилися доцільними переважно для малих за площею сміттєзвалищ. Проте їх застосування пов'язане з необхідністю залучення високовартісного спеціалізованого обладнання, здатного забезпечити точність зондування до одного метра.

Для визначення об'ємних характеристик масивів ТПВ можуть також використовуватись геодезичні та аерокосмічні методи, кожен з яких має свої переваги та обмеження. Точність визначення об'єму значною мірою залежить від просторової щільності вимірювань, що слугують основою для побудови ЦМР [19].

І. Гарасимчук запропонував оперативну методику визначення об'ємів ґрунту, яка дозволяє істотно скоротити трудові та часові витрати на виконання польових і камеральних робіт. У рамках експериментального дослідження було проведено геометричне нівелювання ділянки з подальшим побудуванням ЦМР. Згодом здійснено тахеометричне знімання, за результатами якого рекомендовано максимальну відстань між пікетами встановлювати на рівні 15 м, а на ділянках із різкою зміною ухилів – скорочувати її вдвічі.

О. Ващуком розроблено методику розрахунку об'ємів складів будового та щебеневого матеріалу за даними тахеометричних спостережень. На основі отриманих просторових координат пікетів побудовано дві поверхні, між якими було обчислено об'єм. Обрахунки здійснювалися в програмному середовищі AutoCAD Civil 3D 2012 із використанням трьох методів: вертикальних паралельних перерізів, розбиття насипу на прості геометричні фігури, а також об'ємної палетки за методом П. Соболевського. Найменше відхилення від еталонного значення отримано при застосуванні способів розбиття на найпростіші фігури (0,481 %) та вертикальних перерізів із відстанню 5 м між ними (0,622 %).

У дослідженні Т. Урбанчика об'єми ТПВ оцінювалися за допомогою аерофотознімання, виконаного з безпілотного літального апарата Microdrone MD4-1000. Для експериментів було відібрано три ділянки з об'ємами від 10 000 до 50 000 м³. Об'єкти мали відносно просту геометрію, що забезпечувало кращу

точність обчислень. Порівняння результатів, отриманих за фотограмметричними даними та за даними ГНСС-знімання, засвідчило розбіжності об'ємів менш як 1 % при загальному об'ємі 530 255 м³, площі 71 250 м² та середній висоті 7 м [14].

Аналогічну методику із використанням БПЛА було реалізовано розробниками програмного забезпечення Pix4Dmapper для оцінки об'єму двох гравійних відвалів трапецієподібної форми з висотою 7–10 м. Розрахунок об'ємів здійснено в ГІС шляхом побудови відносної моделі, де початковою поверхнею слугувала умовна площина, змодельована на основі крайових точок досліджуваного об'єкта (рис. 1.5.) Розташування точок для побудови теоретичної (базової або нульової) поверхні є одним із ключових етапів при визначенні об'ємів відходів або насипів, зокрема у фотограмметрії та при використанні ГІС. Теоретична поверхня слугує умовним «дном» об'єкта, з яким порівнюється фактична (зовнішня) поверхня для подальшого обчислення об'єму.

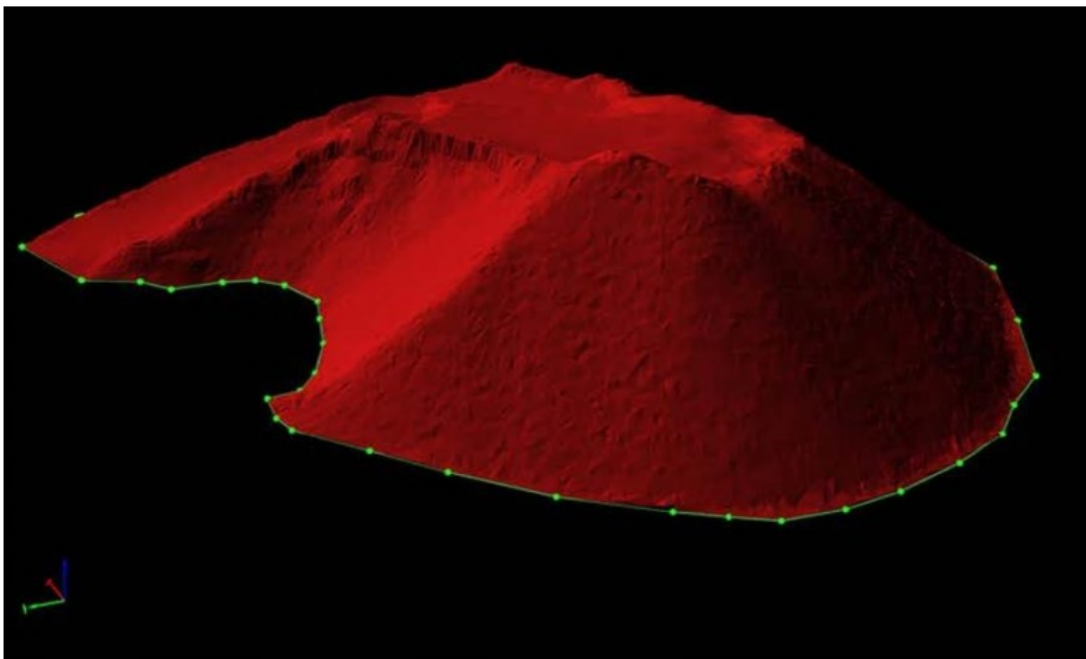


Рисунок 1.5. Розташування точок для побудови базової поверхні

Ю. Лі запропонував методику визначення об'єму ТПВ, що базується на аналізі хмари точок, сформованої в результаті стереофотограмметричної обробки зображень. Цей підхід має потенціал для безперервного моніторингу полігонів та

оцінювання залишкового терміну їх експлуатації. Проте у відповідному дослідженні не уточнено, яка саме поверхня була прийнята за базову для обчислення об'ємів, а також не наведено числові параметри зміни об'ємів [31].

Подальший розвиток методів аерофотознімання за участю БПЛА представлено у працях німецького дослідника В. Маєра, який на основі знімків, отриманих із дронів масою до 5 кг, побудував ЦМР сміттєзвалища, оцінив його об'ємні характеристики та здійснив моніторинг їх змін. У межах своєї методики вчений запропонував алгоритм виконання знімальних робіт та навів приклади високодеталізованої тривимірної геопросторової візуалізації території полігону ТПВ.

Інший приклад використання БПЛА наведено у дослідженні Р. Мидури та колективу авторів, які здійснили обстеження полігону Крістешть (Румунія) із застосуванням програмного забезпечення Agisoft PhotoScan. У результаті було створено ортофотоплан та 3D-модель місцевості, що дозволило визначити як площу, так і об'єм досліджуваного полігону.

До високоточних методів обліку об'ємів відходів належить і застосування системи наземного лазерного сканування (НЛС). Так, у Південній Кореї на полігоні Ансон впроваджено безперервну систему моніторингу на основі НЛС, що забезпечує систематичне вимірювання об'ємних показників і прогнозування терміну експлуатації полігону.

Супутникові методи, зокрема інтерферометрія з синтезованою апертурою (SAR), також довели свою ефективність для моніторингу полігонів ТПВ. Зокрема, В. Каратанасі провів дослідження полігону Ліосіа (Греція), де було ідентифіковано ділянки складування, відстежено зміну їх площ та об'ємів, а також побудовано профільні лінії, що відображають динаміку нашарувань протягом 2003–2004 рр. [32].

Завдяки використанню сучасних космічних платформ з можливістю стереозйомки стало можливим не лише картографування площ сміттєзвалищ, а й визначення висоти тіл відходів (з точністю до 1 м), що дає змогу виконувати

розрахунок об'ємів шляхом побудови цифрових моделей висот. Слід зазначити, що у більшості методик обчислюється саме відносний об'єм на заданий період, при цьому за базову поверхню приймається умовна горизонтальна площина, що не враховує геоморфологічних особливостей території складування, що значною мірою спрощує процедуру обчислення [5].

Що стосується нормативного регламентування точності обчислення об'ємів ТПВ, то національні стандарти у більшості європейських країн, а також в Україні, на сьогоднішній день відсутні. Натомість у Сполучених Штатах Америки вже у 2015 році Департамент з питань ресурсів, утилізації та відновлення штату Каліфорнія використовував стандартизовані рекомендації щодо методів і точності визначення об'ємів відходів на полігонах ТПВ (табл. 1.2).

Таблиця 1.2. Вимоги та методи до визначення об'ємів ТПВ

Метод	Вартість	Точність	Тип полігонів	Розмір
Аерофотознімання	Найвища	10 %	Всі типи	Більше 10 га
Наземні методи	Середня (як правило менша ніж аеро-фотознімання для ділянок менше 4 га)	10–20 %	Всі типи	Менше 10 га
Ваговий (на основі зважування)	Низька (особливо після першого використання)	20–25 %	Всі типи	Для малих полігонів
Траншейний	Низька	5 %	Полігон траншейного типу	Будь який розмір

У процесі визначення площ та об'ємів малих санкціонованих або несанкціонованих сміттєзвалищ, а також полігонів ТПВ, доцільним є застосування геофізичних і траншейних методів. Ефективність цих підходів зумовлена незначними розмірами об'єктів, що дозволяє досягати високої точності

вимірювань за умови використання спеціалізованої апаратури. Крім того, високі результати забезпечують контактні геодезичні методи, зокрема ГНСС-спостереження та тахеометричне знімання.

Для моніторингу середніх і великих за площею полігонів ТПВ доцільно використовувати аерофотознімання з БПЛА. Завдяки мобільності, відносно низькій вартості та здатності забезпечити високоточне отримання просторових даних (ортофотоплани, цифрові моделі рельєфу), БПЛА є ефективним інструментом для оцінювання морфометричних параметрів полігонів. Додатковою перевагою їх використання є дистанційний характер знімання, що, з погляду охорони праці, є безпечнішим порівняно з наземними контактними методами дослідження [21].

1.3. Стратегія та стан поводження з твердими побутовими відходами в Україні та світі. Згідно з офіційними даними Державної служби статистики України, щорічний обсяг утворення відходів у країні становить приблизно 500 млн тонн. Структурно переважають відходи первинного виробництва – 76 %, далі йдуть відходи вторинного виробництва – близько 18 %, сільськогосподарські відходи – 2 %, а також ТПВ, частка яких становить лише 2 %. Попри цю незначну частку, саме ТПВ мають безпосередній вплив на стан довкілля в межах житлових територій, що обумовлює їх важливість у системі управління відходами.

За даними Євростату, середній обсяг утворення відходів у країнах ЄС-27 у 2012 році становив 4,9 тонни на одну особу, тоді як в Україні у 2013 році цей показник досягав 9,9 тонни. Така різниця зумовлена значною питомою вагою промислових відходів в Україні, які становлять до 94 % загального обсягу відходів.

Згідно з інформацією Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, у 2013 році було утворено близько 59 млн м³ або 13 млн тонн ТПВ, що становило приблизно 2–3 % від загального обсягу всіх відходів. Незважаючи на це, ефективне управління побутовими відходами має критичне значення для екологічної безпеки та сталого розвитку міст.

Динаміка утворення ТПВ демонструє стабільне зростання. Так, упродовж 2000–2010 років річний обсяг побутових відходів збільшився на 70 %. Проте варто враховувати, що офіційна система обліку ТПВ була запроваджена відносно недавно, що зумовлює певну статистичну похибку.

У 2000 році середній обсяг ТПВ на одну особу в Україні становив 180 кг, а у 2015 році – вже 270 кг. Для порівняння, у 2022 році середній показник для країн ЄС складав 503 кг/особу, а для нових членів ЄС – 420 кг/особу, що свідчить про наявність значного потенціалу для удосконалення вітчизняної системи поводження з ТПВ (рис. 1.6.).

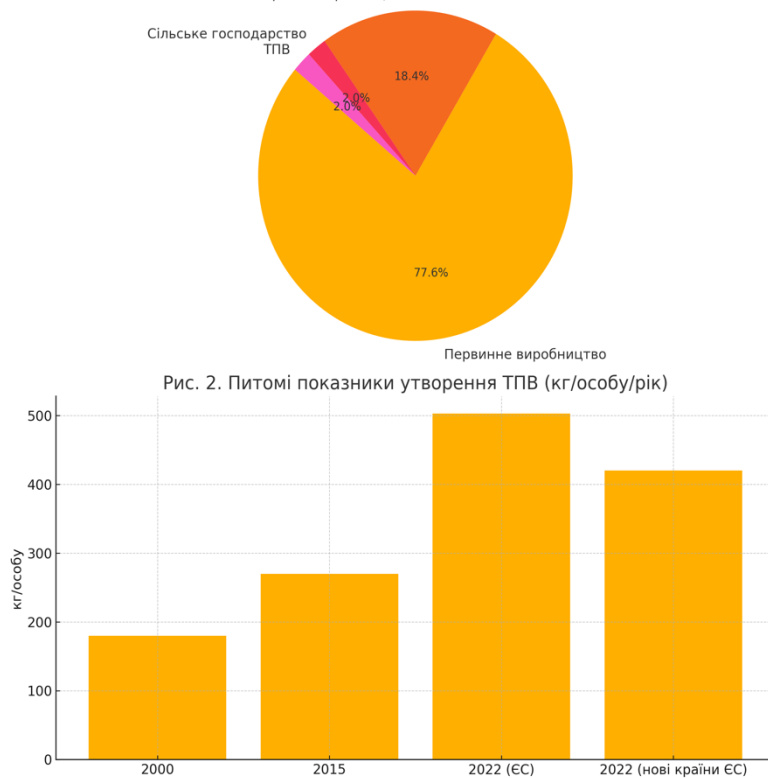


Рисунок 1.6. Структура утворення відходів в Україні за видами діяльності

Станом на 2022 рік, за загальної чисельності населення України 41,78 млн осіб, питомий показник утворення ТПВ становив 302,7 кг на душу населення [24]. Це свідчить про зростання обсягів побутових відходів більш ніж на 10 % порівняно з попередніми періодами (за розрахунковими оцінками). Така динаміка може бути наслідком неефективної державної політики у сфері зберігання,

захоронення, переробки та утилізації ТПВ на тлі соціально-економічної нестабільності, зокрема низького рівня добробуту населення.

Починаючи з 2000 року, структура споживання в Україні зазнала істотних змін: зросла частка товарів та послуг, що характеризуються високим рівнем генерації відходів. Особливо помітне зростання споживання товарів нехарчової групи, що сприяє значному збільшенню обсягів упаковки, яка потрапляє до побутових відходів.

Якісний склад ТПВ є ключовим фактором при формуванні ефективної системи управління відходами. Він визначає технічні й організаційні вимоги до систем збирання, сортування, переробки та утилізації, а також впливає на вибір оптимальних технологічних рішень. Особливого значення структура ТПВ набуває під час обґрунтування моделі поводження з відходами та вибору напрямів ресурсозбереження.

На жаль, в Україні досі відсутні систематичні національні дослідження морфологічного складу ТПВ. Наявні дані ґрунтуються переважно на фрагментарних дослідженнях, виконаних операторами у сфері поводження з відходами або галузевими асоціаціями в окремих регіонах країни. Ці дослідження суттєво відрізняються за результатами, що ускладнює формування узагальнених висновків.

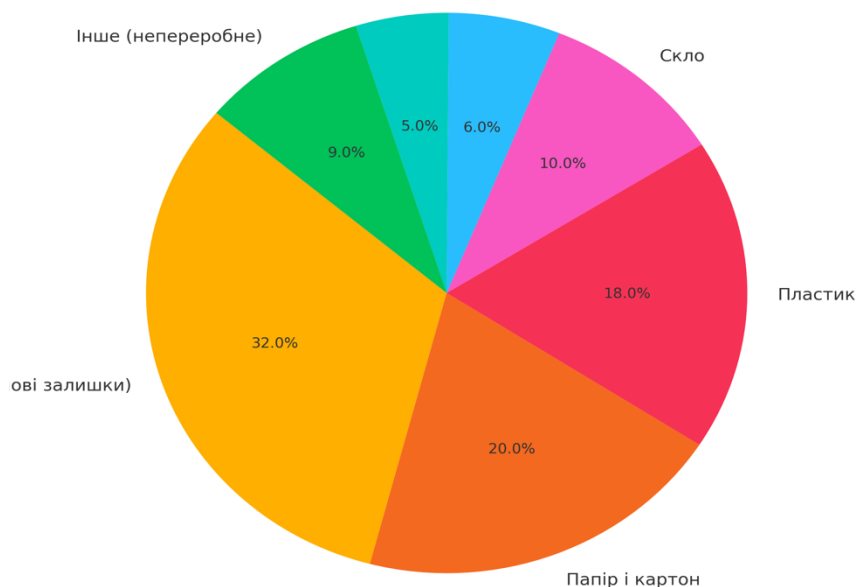


Рисунок 1.7. Морфологічної структури ТПВ в Україні, %

Так, згідно з результатами, отриманими в межах реалізації національного проекту «Чисте місто» (рис. 1.7), найбільшу частку у складі ТПВ становлять органічні відходи (здебільшого залишки харчових продуктів), які перевищують 30 % загального обсягу, а також вторинні ресурси – картон і папір, що входять до складу пакувальних матеріалів.

Згідно з інформацією, наведеною у Шостому національному повідомленні України з питань зміни клімату, морфологічна структура ТПВ включає такі основні компоненти: органічні (харчові) відходи – у межах 35–50 %, папір і картон – 10–15 %, вторинні полімери – 9–13 %, скло – 8–10 %, метали – близько 2 %, текстильні відходи – 4–6 %, будівельні матеріали – 5 %, деревина – 1 % та інші види відходів – від 10 до 14 %. Варіативність у значеннях цих показників, ймовірно, зумовлена обмеженістю вибірки досліджень, а також тим, що певна частина органічних фракцій могла бути не врахована у процесі оцінювання.

Категорія «Інші відходи» охоплює, зокрема, небезпечні компоненти, великогабаритне сміття, електронні та електричні прилади, що вичерпали свій ресурс, а також інші менш поширені типи відходів [23].

Аналіз даних, представлених у Шостому національному повідомленні України з питань зміни клімату (рис. 3.3), засвідчує суттєві відмінності у морфологічному складі ТПВ в Україні порівняно з країнами Європейського Союзу. Зокрема, в Україні спостерігається переважання органічної фракції (харчові відходи), частка якої коливається в межах 35–50 %, що є значно вищим показником, ніж у середньоєвропейських країнах, де цей компонент рідко перевищує 30 %. Така тенденція притаманна переважно країнам Східної Європи, де структура споживання має більший акцент на продуктах харчування, які швидко втрачають споживчу цінність і швидко перетворюються на відходи.

У той час як у західноєвропейських країнах переважає споживання товарів тривалого використання, що формують вищу частку вторинних матеріалів (скло, пластик, метали), в Україні ці компоненти мають нижчу питому вагу у загальній масі ТПВ. Зокрема, частка скла в українських побутових відходах становить лише

8–10 %, а полімерів – 9–13 %, що є меншими показниками порівняно з країнами ЄС, де, наприклад, полімерна фракція часто перевищує 15 %.

Водночас, нижча частка металів (2 %) та деревини (1 %) також свідчить про обмежене використання певних типів упаковки або продукції, що, у свою чергу, знижує потенціал для розвитку системи повторного використання ресурсів. Додатково слід зазначити, що до категорії «Інші відходи», частка яких сягає 10–14 %, включаються компоненти, що потребують спеціалізованого поводження: великогабаритні вироби, небезпечні відходи та застарілі електронні пристрої.

Таким чином, морфологічна структура ТПВ в Україні відображає специфіку соціально-економічного розвитку та споживчих звичок населення і вимагає адаптації системи управління відходами до локальних реалій, із урахуванням високого вмісту органіки та відносно низької частки вторинних ресурсів. Це створює виклики для ефективної організації сортування та переробки, але водночас відкриває можливості для розвитку системи компостування, біогазових установок і покращення первинного збору.

Порівняльний аналіз морфологічного складу ТПВ в Україні та країнах Європейського Союзу свідчить про те, що національна структура побутових відходів більшою мірою відповідає показникам, характерним для країн Східної Європи, зокрема Польщі, Чеської Республіки, Словаччини та держав Балтійського регіону. Для України типовим є суттєво вищий відсоток органічної складової у загальній масі ТПВ, [10].

Загальний рівень переробки ТПВ в Україні залишається вкрай низьким. Згідно з офіційними статистичними даними, лише близько 3,7 % побутових відходів піддаються утилізації, причому цей показник охоплює переважно фракції упаковки. Із загального обсягу оброблених відходів близько 1,2 % спрямовується на спалювання з отриманням енергії, а лише 2,5 % – проходить процес матеріальної переробки (рис. 1.7).

Ці цифри свідчать про істотне відставання України від середньоєвропейських тенденцій у сфері поводження з ТПВ, де рівень переробки коливається у межах 30–50 %, а спалювання з рекуперацією енергії є поширеним та технологічно

відпрацьованим методом. Водночас в Україні переважає практика захоронення відходів, що становить понад 90 % від загального обсягу, що призводить до інтенсивного використання земельних ресурсів, деградації ґрунтів та збільшення викидів парникових газів.

Крім того, обмежений рівень переробки є наслідком низької ефективності системи роздільного збору, недостатнього розвитку інфраструктури сортувальних і переробних підприємств, а також відсутності стимулів для залучення інвестицій у галузь вторинної сировини. У цьому контексті підвищення рівня переробки ТПВ в Україні має стати одним із пріоритетів екологічної політики держави, з урахуванням вимог сталого розвитку, циркулярної економіки та наближення до стандартів ЄС.

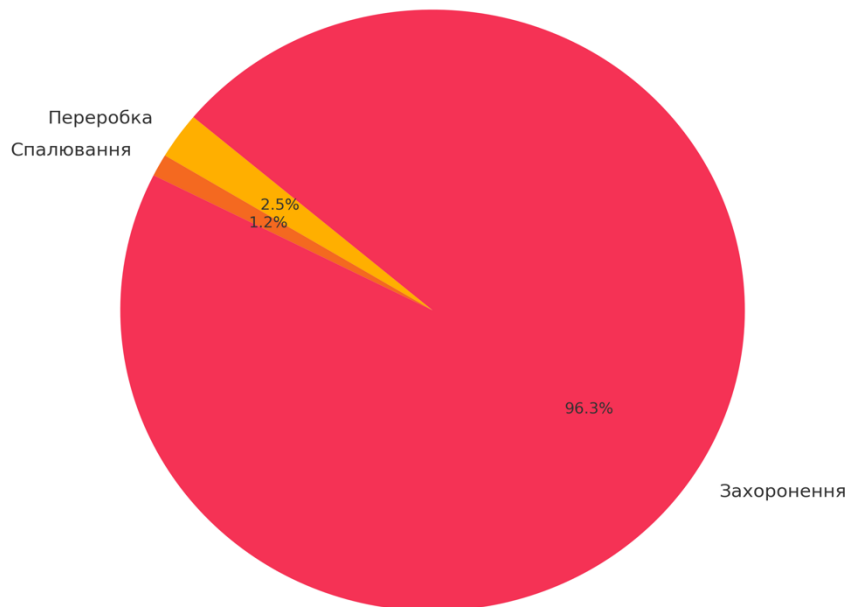


Рисунок 1.8. Структура переробки ТПВ в Україні, %

Згідно з результатами інвентаризації полігонів для зберігання ТПВ, станом на 2019 рік на території України функціонувало понад 6 700 сміттєзвалищ і полігонів, загальна площа яких перевищувала 10 тис. гектарів. При цьому понад 15 % полігонів були перевантажені, а 21 % не відповідали встановленим санітарним нормам. Особливою проблемою є масштабне функціонування нелегальних місць

видалення відходів – за оцінками, у країні нараховувалося близько 30 000 несанкціонованих звалищ загальною площею приблизно 2 000 га.

Поточну ситуацію у сфері поводження з ТПВ в Україні можна охарактеризувати за такими ключовими показниками [24]:

- стрімке зростання питомих обсягів утворення ТПВ – за період 2000–2020 років цей показник збільшився на 70 %, попри скорочення чисельності населення;
- поступове зростання частки перероблюваних фракцій у морфологічному складі ТПВ, що обумовило початок модернізації переробної інфраструктури;
- низький рівень охоплення послугами з поводження з відходами у сільській місцевості, що спричиняє несанкціоноване скидання ТПВ;
- обмежений рівень переробки побутових відходів, який залишається нижчим за 8 %, попри активізацію роздільного збирання у низці міст;
- тенденція до зростання обсягів ТПВ, які вивозяться на полігони та стихійні звалища, що продовжує поглиблювати екологічні ризики.

Накопичення значних обсягів відходів на діючих полігонах спричиняє багаторівневе негативне антропогенне навантаження на довкілля: відбувається забруднення атмосферного повітря, поверхневих і підземних вод, деградація ґрунтів і екосистем, а також порушується цілісність сільськогосподарських ландшафтів і ускладнюється процес залучення земель у господарський обіг. Крім того, утворення звалищного газу призводить до зростання обсягів викидів парникових газів, що спричиняє вплив на зміну клімату.

Існуюча система поводження з відходами в Україні не забезпечує реалізацію економічного потенціалу вторинного використання ресурсів та не відповідає сучасним екологічним вимогам. Більшість діючих полігонів технічно та морально застаріли й не мають спроможності приймати зростаючі обсяги відходів у середньо- та довгостроковій перспективі. Продовження експлуатації цієї інфраструктури без суттєвої модернізації спричинятиме наростання ризиків для довкілля та здоров'я населення.

На відміну від України, в країнах Європейського Союзу щорічно переробляється понад 61 млн тонн ТПВ, що у чотири рази перевищує

середньорічний обсяг утворення побутових відходів в Україні. При цьому рівень переробки побутових відходів у межах ЄС демонструє суттєву диференціацію залежно від країни.

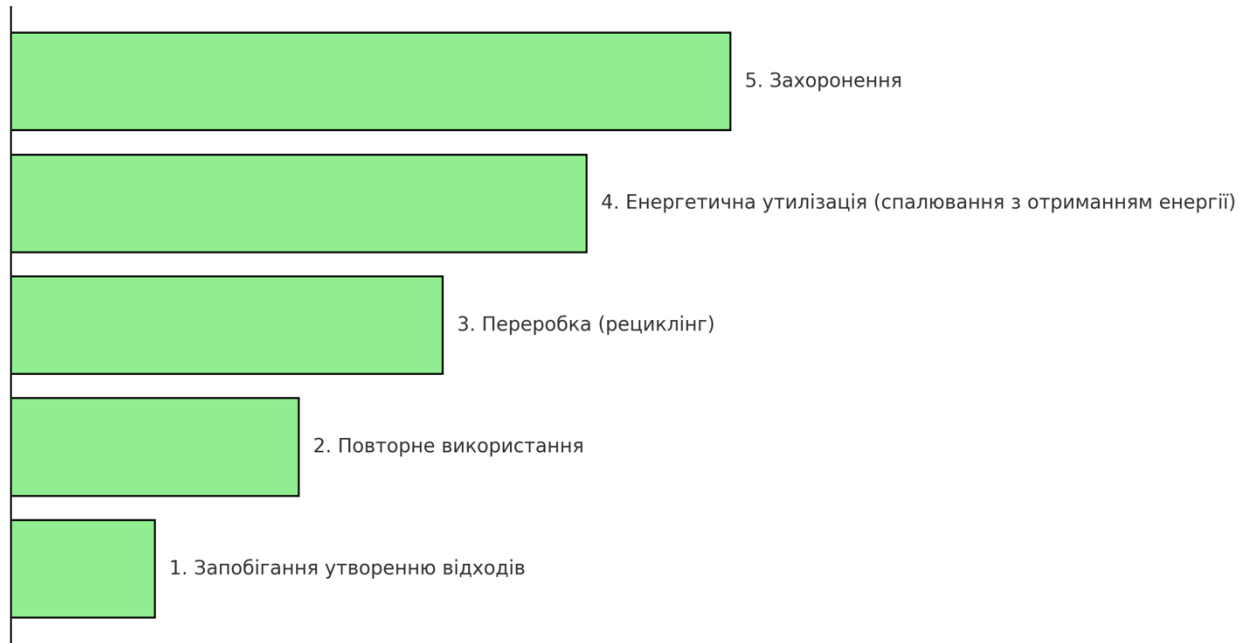


Рисунок 1.9. Показники переробки ТПВ в окремих європейських країнах

Для забезпечення сталого розвитку у сфері управління відходами необхідно сформувати збалансовану систему поводження з ТПВ, що поєднує екологічну ефективність із раціональним використанням матеріальних та енергетичних ресурсів. Досягнення цієї мети вимагає чіткого формулювання довгострокових стратегічних пріоритетів, що мають слугувати основою для формування державної політики та інституційної трансформації галузі.

На відміну від промислових відходів, обсяги яких можливо суттєво скоротити за рахунок впровадження технологічно ефективних виробничих процесів, запобігти утворенню комунальних (побутових) відходів є значно складніше. Це зумовлено тим, що побутові відходи є органічною складовою життєдіяльності домогосподарств і виникають у процесі споживання товарів і послуг: упаковки, харчові залишки, використана побутова техніка тощо. У зв'язку з цим заходи зі

зменшення обсягів побутових відходів мають обмежену ефективність у межах традиційних підходів.

Саме тому європейська політика у сфері поводження з ТПВ не фокусується виключно на запобіганні їх утворенню, а натомість орієнтована на розбудову цілісної, екологічно безпечної системи управління потоками побутових відходів. Основоположним документом у цій сфері є Директива № 2008/98/ЄС Європейського Парламенту та Ради, ухвалена у 2008 році. Вона визначає ключові цілі політики поводження з ТПВ: охорону довкілля, мінімізацію негативного впливу на екологічні системи та збереження здоров'я населення [9].

У межах Директиви сформульовано основні принципи побудови системи поводження з ТПВ, зокрема вимоги до ієрархії підходів і критерії вибору технологій. Хоча структура та механізми реалізації цієї системи делегуються на рівень кожної окремої держави-члена ЄС, її побудова має ґрунтуватися на пріоритетності екологічної безпеки та економічної ефективності. Система ієрархії методів управління ТПВ, представлена у вигляді «сходів Лансінка», слугує графічною моделлю для розподілу пріоритетів під час прийняття рішень у сфері поводження з відходами.

Для забезпечення сталого розвитку у сфері управління відходами необхідно сформувати збалансовану систему поводження з ТПВ, що поєднує екологічну ефективність із раціональним використанням матеріальних та енергетичних ресурсів. Досягнення цієї мети вимагає чіткого формулювання довгострокових стратегічних пріоритетів, що мають слугувати основою для формування державної політики та інституційної трансформації галузі.

На відміну від промислових відходів, обсяги яких можливо суттєво скоротити за рахунок впровадження технологічно ефективних виробничих процесів, запобігти утворенню комунальних (побутових) відходів є значно складніше. Це зумовлено тим, що побутові відходи є органічною складовою життєдіяльності домогосподарств і виникають у процесі споживання товарів і послуг: упаковки, харчові залишки, використана побутова техніка тощо. У зв'язку з цим заходи зі

зменшення обсягів побутових відходів мають обмежену ефективність у межах традиційних підходів.

Саме тому європейська політика у сфері поводження з ТПВ не фокусується виключно на запобіганні їх утворенню, а натомість орієнтована на розбудову цілісної, екологічно безпечної системи управління потоками побутових відходів. Основоположним документом у цій сфері є Директива № 2008/98/ЄС Європейського Парламенту та Ради, ухвалена у 2008 році. Вона визначає ключові цілі політики поводження з ТПВ: охорону довкілля, мінімізацію негативного впливу на екологічні системи та збереження здоров'я населення [9].

У межах Директиви сформульовано основні принципи побудови системи поводження з ТПВ, зокрема вимоги до ієрархії підходів і критерії вибору технологій. Хоча структура та механізми реалізації цієї системи делегуються на рівень кожної окремої держави-члена ЄС, її побудова має ґрунтуватися на пріоритетності екологічної безпеки та економічної ефективності.

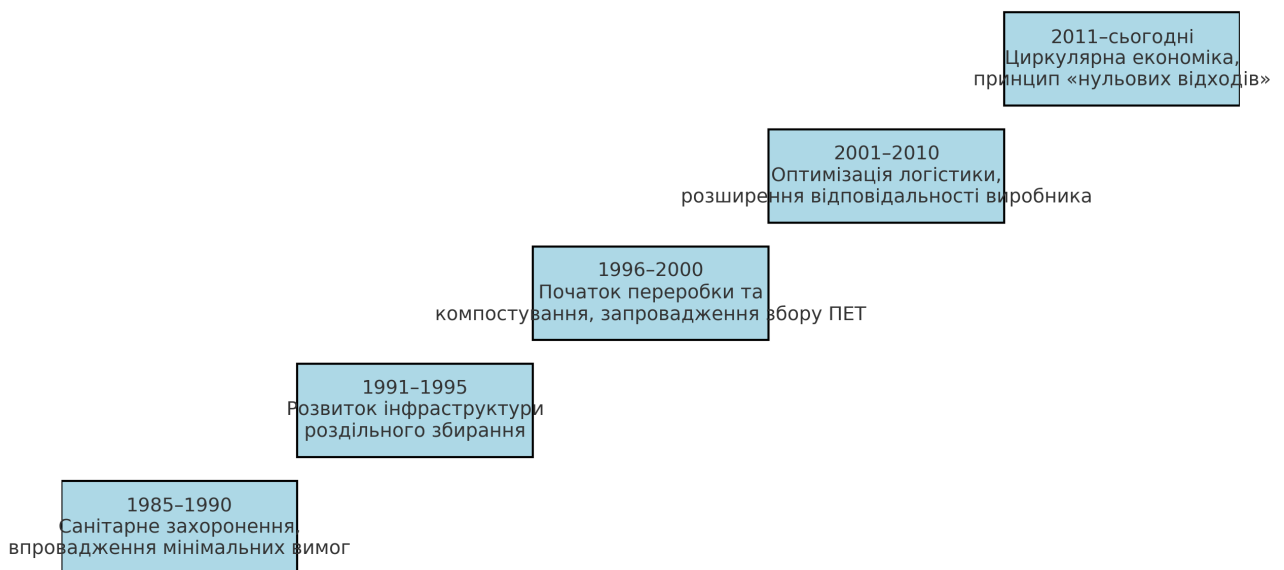


Рисунок 1.10. Етапи розвитку системи управління ТПВ у Фландрії (Бельгія) з 1985 року до сьогодні

Хоча на досягнення високого рівня розвитку системи поводження з відходами у Фландрії (Бельгія) було витрачено понад 35 років, це не означає, що іншим країнам обов'язково потрібно повторювати цей тривалий шлях. Сучасний стан

науково-технічного прогресу, а також наявність апробованих нормативно-правових і управлінських моделей дозволяє країнам з перехідною економікою, зокрема Україні, значно пришвидшити перехід до інтегрованої системи управління ТПВ.

Прикладом успішної адаптації є Угорщина, яка розпочала реформування галузі після вступу до Європейського Союзу. Закладені у Законі про поводження з відходами 2000 року норми передбачали гармонізацію національного законодавства з європейськими вимогами, встановлення відповідальності сторін, механізмів розширеної відповідальності виробника (РВВ) та розроблення Національного плану дій у сфері поводження з ТПВ. Результати реалізації цієї політики стали помітними вже протягом першого десятиліття: частка захоронення зменшилась із 95 % до 80 %, а частка вторинної переробки зросла з 2–3 % до 15 % у 2010 році, досягнувши 42 % у 2020-му. Запровадження екологічного податку на захоронення (10,5 євро/т у 2013 р. з поступовим підвищенням до 42 євро/т у 2026 р.) стало додатковим стимулом для розвитку переробки.

Цей досвід демонструє, що за умов цілеспрямованої політики та ефективної співпраці між публічним і приватним секторами країна з подібними до України стартовими умовами може досягти суттєвого прогресу протягом 10–15 років. Ефективна взаємодія держави та приватних операторів, що спостерігалася в країнах Балканського регіону, відіграла ключову роль у подоланні бар'єрів на початковому етапі: модернізації застарілої інфраструктури, подоланні фінансових обмежень, підвищенні професійного рівня управління та формуванні попиту на якісні послуги з боку населення.

Угорщина, як і деякі інші країни Центрально-Східної Європи, поєднала розвиток переробної інфраструктури з реалізацією програм санації, рекультивації полігонів і модернізації технічних засобів збору та транспортування. Завдяки цьому протягом 10–12 років вдалося не лише оптимізувати витрати, а й знизити потребу в будівництві нових об'єктів для захоронення. Аналогічні результати досягли Сербія, Чорногорія та Албанія, які в період 2005–2008 років реалізували комплексні програми реформування сфери управління ТПВ.

Країни, що досягли найвищих рівнів переробки, зокрема Бельгія, Нідерланди та Німеччина, повністю відмовились від будівництва нових полігонів і практично усунули захоронення ТПВ як домінуючу практику. У країнах Балтії, а також у Чехії, Словаччині та Угорщині протягом 1998–2005 років частка відходів, що перероблялися, зросла з нульового рівня до 20–25 %, а несанкціоновані звалища були ліквідовані або переведені в контрольований статус.

Якщо Україна обере інноваційно-орієнтовану модель розвитку системи поводження з відходами та зуміє досягти рівня переробки у 41 %, то вже до 2025 року можна буде уникнути захоронення 7,4 млн тонн ТПВ, що втричі перевищує обсяги побутових відходів, які утворюються щороку у Фінляндії або Норвегії. Цей сценарій відповідає стратегії сталого розвитку та цілям переходу до циркулярної економіки.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ I

1. У ході дослідження встановлено, що нормативно-правове регулювання поводження з ТПВ в Україні здійснюється на основі таких базових законодавчих актів, як Закон України «Про відходи», Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища», Закон України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення» та низки підзаконних нормативно-правових документів. Окрім цього, на регіональному рівні обласні та міські ради ухвалюють додаткові регламентуючі документи, що стосуються, зокрема, питань екологічної безпеки, захисту довкілля та управління відходами. Особлива увага приділяється адаптації українського законодавства до норм Європейського Союзу, зокрема до положень Директиви № 2008/98/ЄС. Установлено, що чинна нормативна база потребує подальшої модернізації та цифровізації для забезпечення функціонування інтегрованої інформаційної системи екологічного моніторингу у сфері поводження з ТПВ.

2. Проаналізовано сучасні підходи до застосування геоінформаційних систем (ГІС) у процесах управління твердими побутовими відходами. Встановлено, що використання ГІС-технологій дозволяє суттєво оптимізувати логістичні та

економічні аспекти системи: скоротити витрати часу і ресурсів під час планування маршрутів збирання, перевезення, а також розміщення об'єктів складування, переробки й захоронення відходів. З'ясовано стратегію та стан поводження з твердими побутовими відходами в Україні та світі. Розглянуто порівняльні характеристики питомих показників утворення ТПВ на душу населення. Наведено статистичні дані щодо структури ТПВ в Україні та країнах ЄС та наведено порівняльні характеристики показників переробки. Охарактеризовано поточну ситуації в Україні з ТПВ. Наголошено досвіді країн ЄС у поводженні з ТПВ. Зазначено, що показовим для України є досвід розвитку систем поводження з ТПВ у Бельгії та Угорщині.

3. Показано, що застосування геоінформаційних технологій, методів дистанційного зондування Землі, БПЛА та цифрових картографічних систем є критично важливим для забезпечення своєчасного, високоточного моніторингу полігонів ТПВ і прийняття обґрунтованих управлінських рішень.

4. Встановлено, що реформування системи поводження з ТПВ в Україні має базуватися на впровадженні сучасних інформаційних технологій для контролю за утворенням, збиранням, обробкою та утилізацією відходів, орієнтуючись на передовий досвід країн ЄС, де цифровізація процесів стала ключем до екологічної ефективності.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЬ ПОБУДОВИ ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ ПОЛІГОНУ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ НА ОСНОВІ ДЗЗ-ГІС ТЕХНОЛОГІЙ

Інтенсивне зростання обсягів твердих побутових відходів та посилення екологічних викликів, пов'язаних із їх розміщенням, зумовлюють необхідність застосування сучасних науково-технічних підходів до моніторингу та управління полігонами ТПВ. Особливої актуальності набуває інтеграція ДЗЗ і геоінформаційних систем ГІС у процесі моделювання та аналізу просторово-часових змін, що відбуваються на території об'єктів розміщення відходів. Розділ присвячено розробленню моделі побудови інтегрованої системи полігону ТПВ на основі ДЗЗ-ГІС технологій. В межах розділу обґрунтовано теоретичні засади використання дистанційних методів для збору просторових даних, розглянуто математичні моделі оцінювання динаміки накопичення відходів та впливу полігону на навколишнє середовище, а також запропоновано алгоритми декомпозиції функціональних складових системи управління полігоном.

Особливу увагу приділено експериментальним дослідженням із використанням даних аерофотознімання, методам створення цифрових моделей рельєфу різного типу (TIN, GRID) та оцінці точності визначення об'ємних характеристик полігону. Результати дослідження спрямовані на підвищення достовірності моніторингових даних, забезпечення науково обґрунтованого екологічного контролю та розроблення ефективних заходів з оптимізації функціонування полігонів ТПВ.

2.1. Методика визначення об'єму полігону твердих побутових відходів з використанням архівних картографічних матеріалів та матеріалів аерознімання

2.1.1. Польові та камеральні роботи при аерознімання полігону твердих побутових відходів із використанням БПЛА. Завдання визначення об'ємів накопичених відходів на полігонах ТПВ є надзвичайно актуальним у контексті

планування рекультиваційних заходів, екологічного моніторингу та оцінки просторового навантаження на довкілля. Проте у зв'язку з різноманіттям фізико-географічних умов розташування полігонів, геологічними особливостями ділянок, а також впливом природних і техногенних факторів (землетруси, зсуви, підтоплення, паводки, екстремальні погодні явища) розроблення методик визначення об'єму таких об'єктів потребує індивідуалізації підходів для кожного конкретного випадку.

У найпростіших ситуаціях, коли відома конфігурація поверхні і доступна початкова топографічна інформація, об'єм полігону може бути визначений шляхом геодезичного знімання або за допомогою наземного лазерного сканування (НЛС). Сучасне геодезичне обладнання дозволяє оперативно отримувати високоточні дані, необхідні для розрахунку об'ємів. У складніших випадках, зокрема при відсутності початкової ЦМР, основою для відтворення базової поверхні можуть слугувати дані топографічних карт або архівних геоданих. Важливим чинником при цьому є урахування реальної морфології місцевості, що суттєво впливає на точність обчислень.

Полігони ТПВ часто розміщуються в межах існуючих урбанізованих територій, що характеризуються складною топографією. Під час тривалої експлуатації полігону, особливо за умов перевантаження, можуть виникати суттєві зміни ландшафту, включаючи осідання, деформації та зсуви відходів, що несе додаткові екологічні ризики. У післяексплуатаційний період, при розробці проєктів рекультивації таких об'єктів, визначення об'єму відходів є критично важливим для обрахунку необхідної кількості ізолюючого матеріалу. До базових вхідних параметрів таких розрахунків належать площа забрудненої ділянки (га), загальний об'єм накопичення відходів (тис. м³), щорічна динаміка надходження ТПВ (тис. м³) та середня висота тіл полігону.

Одним із ефективних способів отримання об'ємних характеристик полігону є використання аерофотознімання за допомогою БПЛА. У межах експериментальних робіт для моделювання поверхні полігону ТПВ було здійснено аерознімання із застосуванням БПЛА Trimble UX-5. На першому етапі

виконано планування місії у середовищі Trimble Access Aerial Imaging, де створено проєкт польоту, що охоплював три окремі ділянки з урахуванням особливостей рельєфу та технічних параметрів апарата (рис. 2.1). Контроль польоту здійснювався через планшет-контролер Trimble Tablet, який відповідає за повний цикл управління – від генерації маршрутів до забезпечення аварійної посадки.

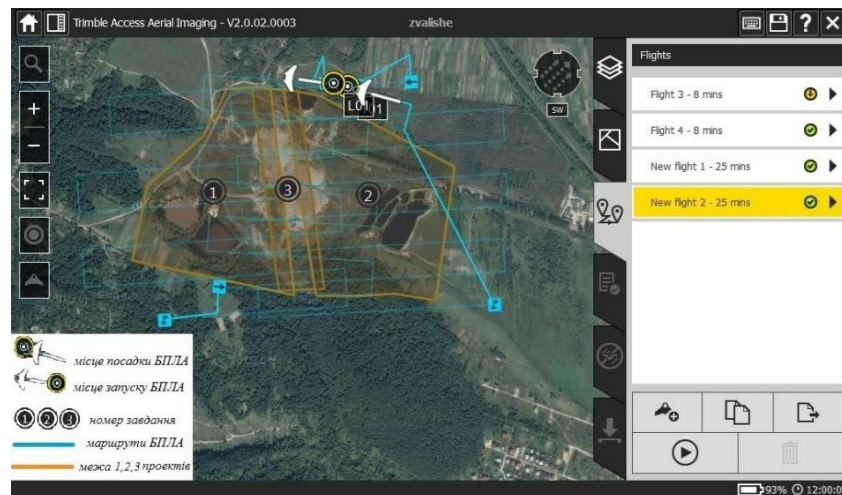


Рисунок 2.1. Планування польотного завдання для аерофотознімання полігону ТПВ у середовищі Trimble Access Aerial Imaging

На схемі представлено структуру польотної місії, яка охоплює три проектні ділянки з урахуванням конфігурації полігону, орієнтації маршрутів зйомки, перекриття знімків та зони запуску/посадки БПЛА. Запланована конфігурація маршрутів забезпечує повне охоплення території дослідження з оптимальним рівнем подовжнього (80 %) і поперечного (60 %) перекриття знімків, необхідного для побудови високоточних ортофотопланів та ЦМР.

Планування аерофотознімання полігону ТПВ супроводжувалося низкою просторових обмежень і технічних викликів, які необхідно було врахувати при виборі зони запуску та посадки безпілотного літального апарата Trimble UX-5. З південної сторони полігон межує з густим лісом, що унеможлиблює організацію вільної злітно-посадкової смуги, а з північного та північно-західного напрямку рельєф є різко горбистим і зарослим чагарниками. Такі умови створюють значні

труднощі для безпечного старту й завершення польоту апарата, особливо в умовах обмеженої маневровості.

Додатковим фактором, який ускладнював польотне планування, став значний перепад висот (понад 50 м) між ділянками першого й другого проектів, що створює ризики втрати сигналу між контролером і БПЛА під час виконання завдання. Крім того, під час попереднього польового огляду було виявлено наявність великої кількості птахів у зоні сміттєзвалища, які могли становити загрозу для стабільного виконання місії.

На основі попередніх досліджень та тестових запусків, у яких було зафіксовано втрату зв'язку при висоті знімання 300 м та віддаленні БПЛА більш як 400 м від контролера (що спричиняло аварійну посадку), було обрано альтернативну локацію. Найбільш оптимальним рішенням стала ділянка, розташована у північній частині полігону, яка характеризується помірним ухилом та близькістю до основного тіла полігону.

Вибрана зона забезпечує низку технічних і безпекових переваг:

- наявність прямих ліній видимості між апаратом і наземним контролером протягом усього польоту;
- захист від вітрового навантаження за рахунок природних насаджень;
- наявність трав'яного покриву й невисокої рослинності, що створює сприятливі умови для м'якої посадки;
- можливість здійснення злету й посадки в обох напрямках – як проти вітру, так і за вітром.

Для підвищення точності побудови ЦМР було розроблено три окремі польотні проекти на різних висотах, кожен з яких мав задані параметри подовжнього та поперечного перекриття (табл. 2.1). Їх конфігурація враховувала рельєфні особливості території, а перетини між маршрутами забезпечували суцільне покриття без втрати геометричної точності. Програмне середовище Trimble Access Aerial Imaging дозволило виконати автоматичну генерацію польотної сітки, обрахувати тривалість місії, площу покриття та просторову роздільну здатність зображень відповідно до вибраної висоти знімання.

Набутий досвід є цінним для подальших досліджень аналогічних об'єктів, що характеризуються складною топографією та природними перешкодами для безпілотного моніторингу.

Таблиця 2.1. Параметри аерофотознімання БПЛА

№ проекту	Повздожнє та поперечне перекриття,%	Висота знімання, м	Розмір пікселя, см	Час знімання, хв
Проект 1	70	300	9,57	8
Проект 2	70	260	8,29	9
Проект 3	70	280	8,93	8

На основі методичних положень, викладених у [7], було проведено обчислення середньої квадратичної похибки (СКП) визначення просторових координат точок місцевості, отриманих за результатами аерофотознімання з використанням безпілотного літального апарата. Розрахунки проводилися для знімального матеріалу, отриманого на трьох різних висотах польоту: 260 м, 280 м та 300 м.

Кожен набір знімків було оброблено у відповідному програмному середовищі з подальшим виконанням фотограмметричного моделювання та геодезичної прив'язки. В результаті були отримані значення СКП для кожної висоти, що дозволяє порівняти вплив висоти знімання на точність просторової фіксації об'єктів.

Отримані результати дозволяють зробити висновки щодо оптимальної висоти польоту БПЛА для забезпечення балансу між роздільною здатністю знімків, стабільністю польоту та допустимими величинами похибок при побудові ортофотопланів і цифрових моделей рельєфу.

Таблиця 2.2. Априорне значення СКП

№ проекту	Висота знімання (м)	В (м)	m_{ZH}	m_{xM} .	m_y м.	m_{zM} .
1	300	100	1:2000	0.24	0.18	0.30
2	260	90	1:1733	0.20	0.15	0.25
3	280	80	1:1866	0.26	0.19	0.33

За результатами аналізу априорних значень СКП координат точок, отриманих у межах аерознімання, встановлено, що найвищу точність було досягнуто під час виконання другого польотного проекту. Однак, з огляду на об'єднання знімальних даних усіх трьох проектів в єдиний фотограмметричний блок, загальні значення СКП координат у плані становлять 0,26 м, а за висотою — 0,33 м. Такі показники є достатніми для створення високоточного ортофотоплану та ЦМР.

У межах процесу координування виконано фотоабрисування всієї території полігону, яке надалі було використано для ідентифікації опорних точок на фотознімках. Загалом було закоординовано 32 опорні точки, рівномірно розташовані по межах усіх трьох проектів. З урахуванням морфологічної складності рельєфу об'єкта та наявного перепаду висот на тілі полігону, для забезпечення більшої просторової достовірності фотограмметричних розрахунків було додатково закладено кілька опорних точок на схилах і у центральній частині полігону.

Польові виміри координат опорних знаків проводились із використанням високоточного ГНСС-приймача Trimble R7 у режимі RTK (кінематика реального часу), з підключенням до мережі базових станцій GEOTERRACE. Отримана точність визначення становила 3–5 см у плановому положенні та до 10 см за висотою, що відповідає вимогам до масштабу знімання для інженерно-геодезичних цілей.

Після завершення етапу польових робіт усі отримані висотні позначки було приведено до Балтійської системи висот для забезпечення сумісності з наявними топографічними та кадастровими картографічними матеріалами.

2.1.2. Створення ортофотоплану та ЦМР. Отримані в результаті польотної місії аерофотознімки було оброблено за допомогою програмного забезпечення Trimble Business Center Photogrammetry (ТВС), яке забезпечує широкі функціональні можливості для створення просторових моделей місцевості, включно з хмарами точок, ортофотопланами, нерегулярними трикутними сітками (TIN) та ізолінійними картами [28].

Послідовність дій включала такі основні етапи:

–імпорт знімків із трьох польотних проєктів, виконаних на різних висотах (260 м, 280 м, 300 м);

–вибір відповідної системи координат згідно з локальним Державним геодезичним стандартом;

–об'єднання окремих проєктів в єдиний фотограмметричний блок для комплексної обробки;

–виконання зовнішнього орієнтування знімків на основі опорних точок, отриманих за допомогою ГНСС-спостережень;

–урівноваження положень фотографічних станцій, що дозволило забезпечити узгодженість геометричної моделі сцени.

У результаті обробки отримано високоточний ортофотоплан, хмару просторових точок, а також TIN-модель рельєфу, які разом формують повноцінну базу для подальшого аналізу морфології полігону, обчислення об'ємів ТПВ, просторової візуалізації та прийняття рішень у сфері рекультивації чи планування інфраструктури (рис. 2.2).

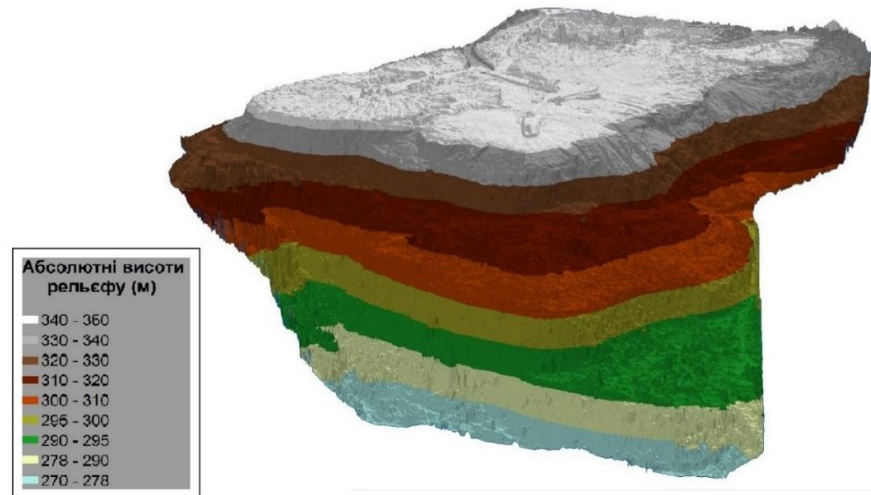


Рисунок 2.2. TIN-модель аерознімання за допомогою БПЛА

Застосування БПЛА для отримання просторових даних значно підвищує ефективність топографо-геодезичних робіт, забезпечуючи скорочення як тривалості польових операцій, так і обсягів камерального опрацювання даних. Такий підхід дозволяє оптимізувати кількість залученого персоналу та зменшити загальні витрати на виконання знімальних робіт.

У табл. 2.3 наведено порівняльну характеристику часових та трудових затрат при використанні БПЛА, що ілюструє їх перевагу над традиційними методами знімання в умовах складного рельєфу та обмеженого доступу до об'єкта дослідження.

Таблиця 2.3. Затрати часу та потреба трудових ресурсів на виконання робіт

№	Вид робіт	Затрати часу	Потреба у виконавцях (осіб)
1.	Польові роботи		
1.1	Координування опорних точок	3 год.	2
1.2	Виконання аерофотознімання	25 хв.	2
2.	Камеральні роботи	4 год.	1

Здолбунівський полігон є діючим об'єктом захоронення ТПВ, на території якого постійно перебуває спеціалізована техніка: сміттєвози, трактори, бульдозери, а також транспортні засоби обслуговуючого персоналу. Водночас недіюча частина полігону характеризується наявністю самозаліснення, зокрема

чагарників заввишки до 2 м. Ці об'єкти, як і всі інші надземні елементи (транспорт, будівлі, люди), були включені до первинної хмари точок, сформованої за результатами аерознімання.

Для забезпечення точності побудови ЦМР перед початком моделювання було здійснено попередню класифікацію та видалення всіх об'єктів, які не належать до класу рельєфу. Це дозволило ізолювати поверхню фактичного нагромадження відходів від тимчасових або нехарактерних елементів ландшафту.

Найпоширенішими моделями представлення рельєфу в геоінформаційних системах є TIN- (нерегулярна трикутна сітка) та GRID-моделі. У цьому дослідженні для обчислення об'єму сміттєвого тіла було використано TIN-моделі, сформовані в програмному середовищі ArcGIS за допомогою інструменту Surface Difference. Даний інструмент виконує обчислення об'ємів шляхом побудови трикутних призм між двома поверхнями, де базовою вважається теоретична або нульова площина.

У результаті моделювання визначено, що:

- загальна площа покриття сміттєвого тіла становить 274 527 м²;
- загальний об'єм тіла відходів складає 4 072 357 м³.

Інструмент Surface Difference не лише обчислює числові значення об'ємів, а й створює візуальні моделі відмінностей між поверхнями (розбіжностей у висоті). Важливо зазначити, що обчислення об'єму здійснюється шляхом сумування об'ємів трикутних призм із непаралельними основами, математичний алгоритм яких розроблений компанією ESRI і є захищеним авторським правом. Відтак, виконання апріорної аналітичної оцінки точності результатів, отриманих цим методом, є обмеженим.

Для додаткового контролю морфометричних параметрів полігону побудовано ізопакітні карти висоти тіла відходів. Зокрема, у південній частині полігону було зафіксовано максимальну висоту складування понад 50 м, що дає змогу простежити як загальну морфологію полігону, так і структуру окремих елементів рельєфу, зокрема ярів (рис. 2.3).

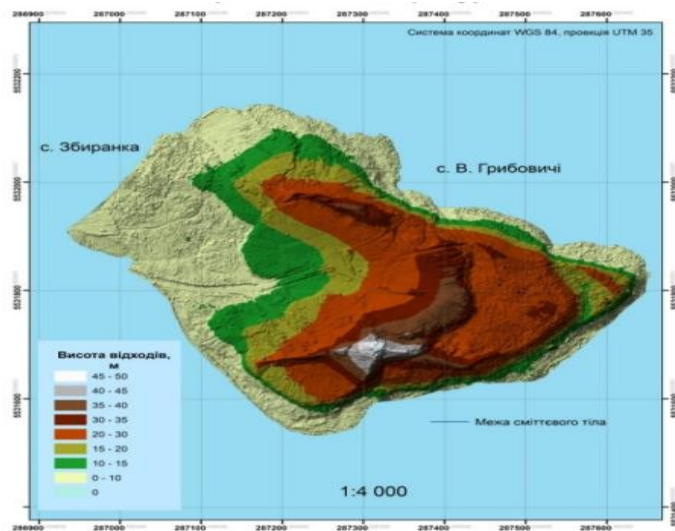


Рисунок 2.3. Ізопахіти відходів

У межах просторового аналізу полігону ТПВ проведено порівняння різних методів інтерполяції при побудові ЦМР типу GRID та TIN для подальшого визначення об'ємів сміттевого тіла. Модель GRID, що базується на регулярній сітці, має певні переваги у швидкості розрахунків і простоті реалізації, проте вона не завжди коректно відображає складні морфометричні характеристики території. Особливо це стосується зон з різко контрастним рельєфом — поєднанням пологих ділянок і крутих уступів.

На відміну від цього, модель TIN дозволяє більш точно відтворювати рельєф за рахунок використання нерегулярної трикутної сітки, в якій великі трикутники утворюються на рівнинних ділянках, а дрібні — на крутих схилах. Основою побудови TIN є триангуляція Делоне, що забезпечує високу геометричну точність при моделюванні поверхонь. Завдяки цим властивостям TIN-модель є пріоритетною для задач, пов'язаних з детальним відображенням складного рельєфу та точним обчисленням об'ємів.

Водночас GRID-модель, хоч і поступається за точністю, має значні переваги в обчислювальній ефективності, що є важливим при обробці великих обсягів даних або роботі з динамічними потоками поверхонь.

Порівняння різних методів інтерполяції при побудові GRID-моделей, зокрема TLI (Triangular Linear Interpolation), IDP (Inverse Distance Power), Kriging, NN (Nearest Neighbor) та RBF (Radial Basis Function), засвідчило, що лише TLI

дозволяє отримати об'єм, близький до розрахунків, виконаних за допомогою TIN. Це пояснюється тим, що метод TLI аналогічно використовує триангуляцію Делоне та застосовує лінійну інтерполяцію всередині кожного трикутника, що забезпечує відповідність геометричній логіці побудови TIN-моделі.

Результати моделювання представлено на рис. 2.4, де наведено графік зміни об'ємів при використанні різних інтерполяційних методів і розмірів комірки GRID. Найбільше відхилення виявлено для методу IDP — до 12%, що у абсолютних значеннях відповідає близько 25 000 м³. Методи Kriging, NN та RBF продемонстрували відносні похибки в межах 8–9%, з абсолютними відхиленнями від 14 000 до 42 000 м³.

Аналіз змін похибки f при варіації розмірів комірки від 5 см до 20 м показав наступні результати:

IDP – 0,53% (~25 000 м³),

Kriging – 0,51% (~29 000 м³),

NN – 0,23% (~14 000 м³),

RBF – 1,14% (~42 000 м³).

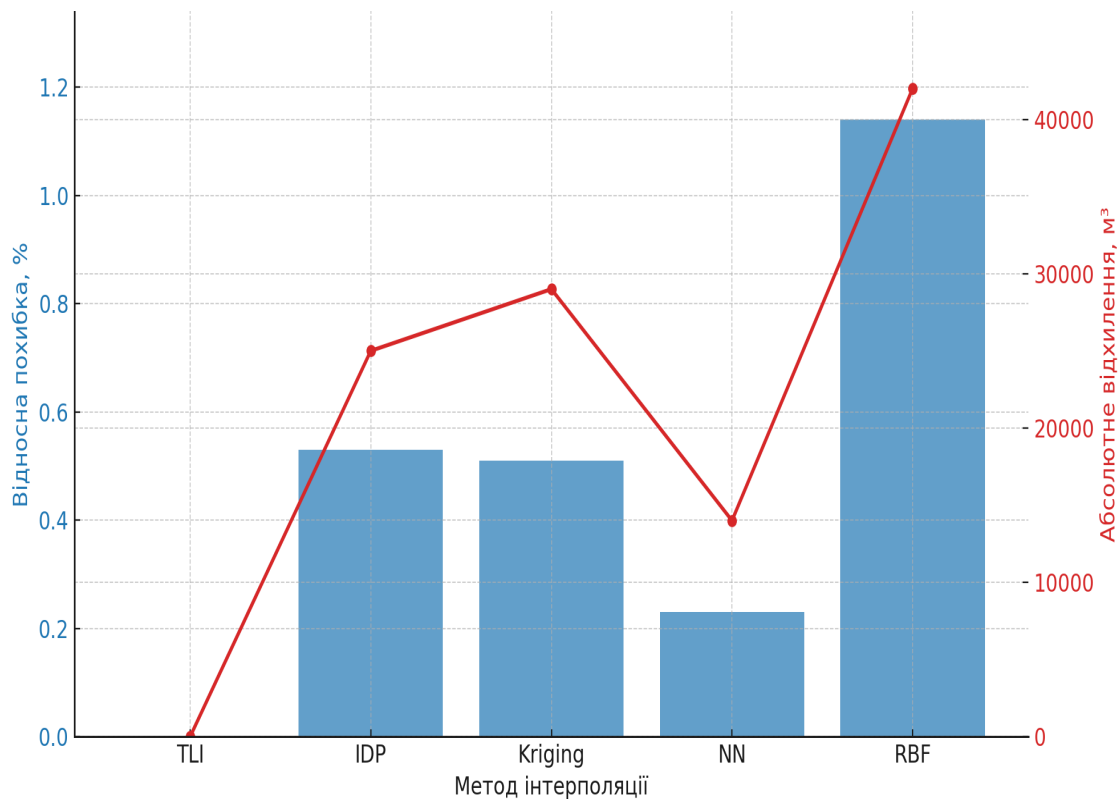


Рисунок 2.4. Порівняння методів інтерполяції за відносною похибкою (%) та абсолютним об'ємом відхилення (м³) при моделюванні полігону ТПВ

Незначна варіативність обчисленого об'єму при зміні розміру GRID-комірки свідчить про складну морфологічну будову рельєфу полігону ТПВ, який характеризується наявністю трьох чітко виражених терас з перепадами висот до 80 м і значними ухілами, що досягають 90°. Така топографічна структура суттєво ускладнює математичне апроксимування поверхні за допомогою класичних інтерполяційних функцій.

У зв'язку з цим виникає необхідність проведення комплексу теоретичних і прикладних досліджень, спрямованих на вдосконалення підходів до моделювання рельєфу за даними БПЛА-знімання та на основі наявних картографічних матеріалів. Особливу увагу слід приділити розробці методики оцінки точності обчислення об'ємів за допомогою TIN-моделей, з урахуванням геоморфологічної складності полігонів та просторової неоднорідності висотних показників.

2.2. Теоретичні та експериментальні дослідження Здолбунівського полігону з використанням TIN-моделей

2.2.1. Створення топографічного плану полігону твердих побутових відходів комбінованим методом. У зв'язку з функціонуванням та постійною трансформацією території Здолбунівського полігону ТПВ виникла потреба в оновленні картографічної інформації щодо його морфометричних характеристик і прилеглих територій. Зокрема, передбачено створення великомасштабного топографічного плану масштабу 1:500 з ізогіпсами, проведеними через кожні 0,5 м висоти рельєфу.

Під час реалізації проєкту необхідно було врахувати низку факторів, які суттєво впливають на точність знімання та подальше моделювання:

- вибір методу та меж знімання, обумовлений геометричною конфігурацією тіла полігону та особливостями навколишнього ландшафту;

- періодичні загоряння відходів, які спотворюють результати фотограмметричного аналізу при створенні ортофотоплану та цифрової моделі рельєфу;

- наявність небезпечних ділянок із ризиком повторних зсувів, що визначає доцільність застосування дистанційних методів з використанням БПЛА.

Сучасні програмні продукти дозволяють ефективно створювати ЦМР як основу для побудови топографічних карт та планів. При цьому рельєф на плані може відображатися горизонтелями, отриманими за двома підходами:

1. Автоматизоване генерування ізогіпс на основі цифрової моделі рельєфу.

2. Ручна векторизація ізогіпс за стереомоделлю в умовах стереофотограмметричного аналізу.

Перший метод реалізується в таких ПП, як ArcGIS, Surfer або Digital, які пропонують різноманітні алгоритми інтерполяції. Дослідження показали, що метод Крайгінга за оптимально підібраними параметрами забезпечує найкращу точність моделювання рельєфу. У порівнянні з ним мультіквадратичні та логарифмічні функції демонструють гірші результати з відхиленням у межах 1,3–1,4 рази. Крім того, перспективним є використання TIN-моделей у поєднанні з

гідрографічними даними, що дозволяє застосовувати напрацьовані алгоритми також для картування дна водних об'єктів.

Другий метод — ручна векторизація — актуальний для складних поверхонь, таких як льодовики, або ділянок з високими контрастами у рельєфі, де автоматичне моделювання виявляється недостатньо точним.

Для отримання топографічної основи було виконано аерофотознімання за допомогою БПЛА на трьох висотах: 110, 130 та 150 м, відповідно до трьох окремих знімальних проєктів. Для оцінки точності просторового позиціонування точок побудови ЦМР були розраховані середні квадратичні похибки (СКП) координат точок відповідно до методики, запропонованої А. Лобановим [7]. Узагальнені результати подано в таблиці 2.Х.

Таблиця 2.4. Априорне значення СКП визначення координат точок

№ проєкту	Висота знімання (м)	В (м)	m_{ZH}	m_x (м)	m_y (м)	m_z (м)
1	110	40	1:500	0,05	0,06	0,07
2	130	50	1:500	0,06	0,08	0,09
3	150	60	1:500	0,07	0,09	0,11

Отримані значення середніх квадратичних похибок координат повністю відповідають вимогам точності, встановленим Інструкцією з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000 та 1:500 [6], що підтверджує придатність застосованої методики для створення топографічного плану в масштабі 1:500 на основі аерофотознімання з використанням БПЛА.

2.2.2. Польові та камеральні роботи при аерозніманні полігону із використанням БПЛА TRIMBLE UX-5. На етапі попереднього рекогностування було проведено аналіз місцевості, який включав визначення меж запланованої знімальної ділянки та оцінку можливості застосування контактних і дистанційних методів збору даних (рис. 2.5).

За результатами проведеного аналізу було ухвалено рішення щодо застосування аерофотознімання з використанням БПЛА для охоплення всієї території лісопаркової місцевості полігону ТПВ. Водночас, зважаючи на щільність рослинного покриву та обмежену видимість у межах лісового масиву, для цієї ділянки було обґрунтовано доцільність застосування тахеометричного знімання, як найефективнішого контактного методу фіксації рельєфу в умовах складної просторової структури.



Рисунок 2.5. Ділянки меж використання дистанційних та контактних методів знімання на знімку Google Earth

При складанні проекту робіт в камеральних умовах це дало можливість змінювати як якісні, так і кількісні характеристики очікуваних результатів залежно від особливостей ділянки знімання.

Розрахунок параметрів аерознімання БПЛА, виконаний в Trimble Access Aerial Imaging, подано в табл. 2.5.

Таблиця 2.5. Параметри аерофотознімання БПЛА

№ проекту	Повздовжнє та поперечне перекриття, %	Висота знімання, м	Розмір пікселя, см	Час знімання, хв
Проект 1	70	150	4,80	8
Проект 2	70	130	4,20	9
Проект 3	70	110	3,70	8

У процесі планово-висотної прив'язки матеріалів аерофотознімання було закоординовано 33 опорні точки, що забезпечило необхідну геодезичну основу для подальших камеральних робіт. З метою ідентифікації опознаків на фотознімках виконано фотоабрис місцевості, який використовувався для точного розпізнавання контрольних точок під час обробки зображень.

Визначення координат виконувалося за допомогою GNSS-приймача Trimble R7 у режимі кінематики реального часу (RTK) з використанням мережі базових станцій GEOTERRACE.

Досягнута точність визначення координат опорних точок становила 3–5 см у плановому положенні та до 10 см по висоті, що повністю відповідає вимогам топографічного знімання у масштабі 1:500.

Створення ортофотоплану та ЦМР. У липні та серпні 2021 р. була проведена зйомка Здолбунівського сміттєзвалища ТПВ з безпілотного літального апарату мультикоптерного типу. У результаті отримані ортофотоплани з розширенням 4 см на пікселі, на їх основі побудовані кілька інфографік, а також зроблений розрахунок об'єму.

Практичний досвід та дослідження показали, що ефективне застосування БПЛА тої чи іншої конструкції та отримання якісного кінцевого матеріалу повинно визначатись поставленим завданням, розміром об'єктів та дотриманням

стандартних вимог, передбачених аерофотозйомкою. Окрім картографування, застосування даних БПЛА дозволяє ефективно вирішувати інженерні завдання.

Використання БПЛА як аерофотознімальної платформи є доцільним і ефективним при зніманні об'єктів з обмеженою площею або лінійної конфігурації, оскільки забезпечує високу просторову деталізацію та оперативність отримання результатів. Дані, отримані внаслідок використання безпілотних літальних апаратів, дозволяють формувати високоякісні картографічні матеріали (ортофотоплани, цифрові моделі рельєфу та місцевості), за умови дотримання таких ключових умов:

- використання аерофотознімальної апаратури, яка відповідає встановленим технічним вимогам щодо точності, роздільної здатності та стабільності платформи під час польоту;

- забезпечення систематичної фотограмметричної обробки знімків, що передбачає комплекс процедур із внутрішнього та зовнішнього орієнтування, генерації хмари точок, створення ЦМР та побудови ортозображення.

У цілому процес створення ортофотоплану з використанням БПЛА можна поділити на наступні послідовні етапи:

1. Планування аерознімального проєкту..
2. Кольорова корекція отриманих зображень.
3. Присвоєння знімкам географічної прив'язки в просторі.
4. Створення ортофотоплану.
5. Створення цифрової моделі місцевості.

Під процесом знімання розуміється виїзд на об'єкт, розміщення необхідного обладнання і запуск БПЛА. Політ проходить в автоматичному режимі по заздалегідь спланованій траєкторії, записаній в пам'яті бортового комп'ютера БПЛА. Під час польоту БПЛА безперервно робить серію знімків з заданим інтервалом, при цьому бортовий комп'ютер фіксує координати та висоту центру фотографування. Таким чином, ми отримуємо масив фотографій з відомими координатами центрів фотознімків. При умові правильно виставленого інтервалу запуску затвору камери, який забезпечує приблизно 80% перекриття зображень,

на виході ми отримаємо цілісний ортофотоплан, який не матиме розривів чи так званих «білих плям», які утворюються через недостачу даних.

За допомогою спеціалізованого програмного забезпечення AgiSoft Photoscan отриманий масив фотознімків трансформується в ортофотоплан і цифрову модель місцевості, так звану карту висот. При цьому, варто зазначити, що просторове розширення може досягати 4 см та 20 см на піксель відповідно. Таким чином, ми отримуємо два геоприв'язаних зображення, одне з яких показує висоти на місцевості.



Рисунок 2.6. Вигляд готового ортофотоплану полігону

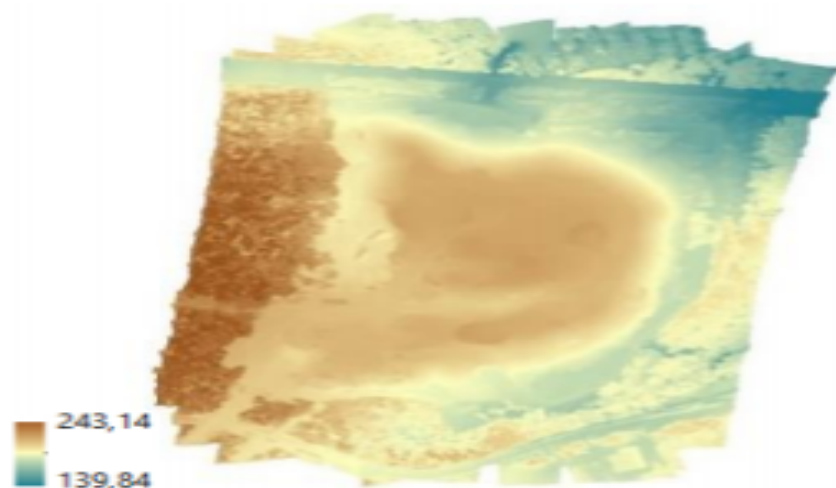


Рисунок 2.7. Вигляд карти висот Здолбунівського сміттєзвалища

Тепер на основі даних зображень можна виконувати різноманітні завдання, найбільш потрібні з яких – візуалізація та розрахунки площі і об'єму. Завдяки тому, що карта висот являється растром, що містить у собі дані про висоти, являється можливим візуалізувати зображення в трьохвимірному просторі за допомогою програмного забезпечення AgiSoft Photoscan.

Таким чином, тепер можна створювати наглядні моделі, розрізи профілів та інфографіку.



Рисунок 2.8. Вигляд трьохвимірної моделі Здолбунівського сміттєзвалища

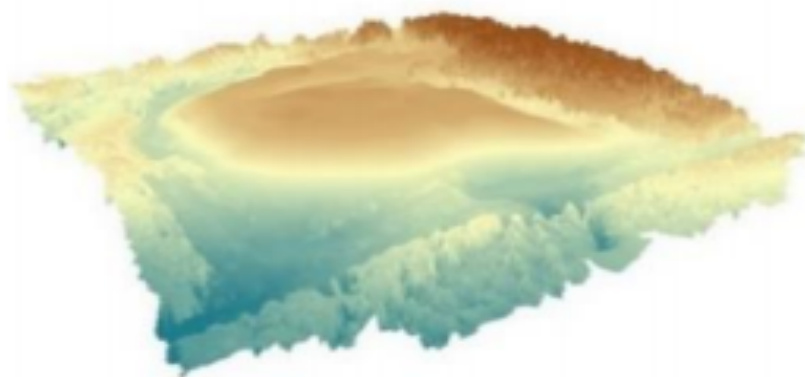


Рисунок 2.9. Вигляд карти висот Здолбунівського сміттєзвалища

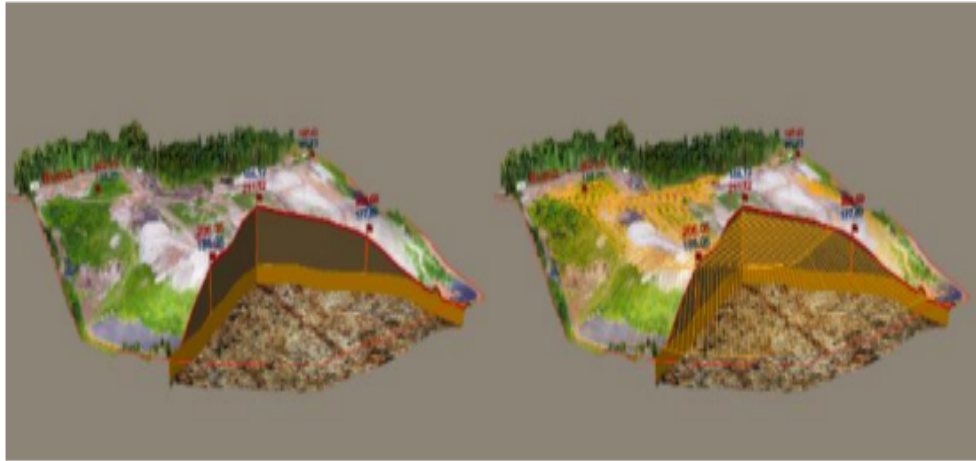


Рисунок 2.10. Вигляд трьохвимірної моделі Здолбунівського сміттєзвалища в розрізі. Показано підстиляючий шар суглинків, пробурені скважини, їх відмітки та уріз

Виконання розрахунків об'єму Здолбунівського сміттєзвалища ТПВ. Для цього необхідно мати дані про висоти за минулі роки, або ж, інтерполювати поверхню виходячи з дійсних висот в точках, що знаходяться поблизу сміттєзвалища. Таким чином, виходить дві поверхні: перша – відображає ситуацію на даний момент, друга – відображає ситуацію за більш ранні періоди або умовну поверхню. За допомогою інструменту просторового аналізу ми можемо розрахувати об'єм шляхом розрахунку різниці висот між двома поверхнями. Результатом роботи цього інструменту є растр, на якому видно області, де було підняття чи просідання рельєфу, або ж де абсолютна висота не змінювалась. Крім того, в атрибутивній таблиці растру міститься розрахунок об'єму в одиницях проекції – m^3 .

Як видно на рис. 2.7 перший запис в таблиці атрибутів відповідає найбільшій площі сміттєзвалища, що змінює свою висоту в порівнянні з вихідною поверхнею. Записи в таблиці, які починаються з мінуса, характеризують об'єм позитивних форм рельєфу, інші, відповідно, негативних. Кожний запис відповідає окремому поєднанню комірок і характеризує їх площу та об'єм, показуючи результат в одиницях проекції, тобто в m^2 та m^3 відповідно (рис.2.11-2.12.).

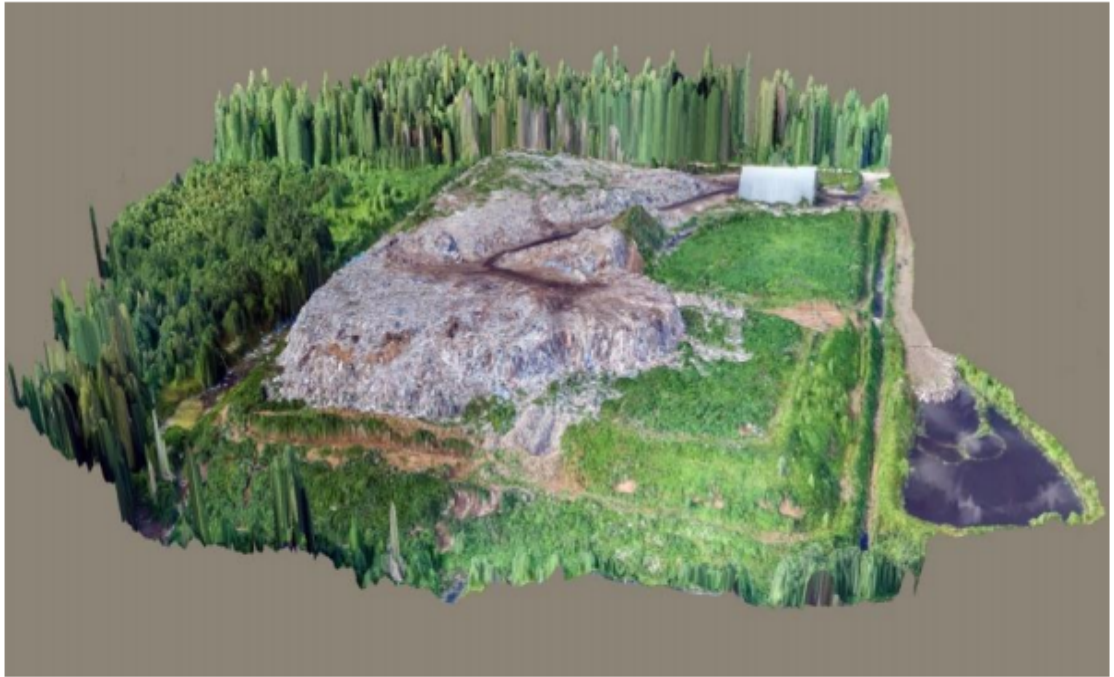


Рисунок 2.11. Вигляд трьохвимірної моделі Здолбунівського сміттєзвалища

№	Ymin	Count	YMAX	AREA
1	1	1	0.107394400000	0
2	1	3	0.477722167500	3
3	1	2	-1.004821054000	2
4	1	1	0.220115000000	1
5	1	0	0.188701000000	0
6	7	1	0.20208117611201	1
7	0	3	0.343200000000	3
8	0	1	-0.010347167500	1
9	0	4	0.107437700000	4
10	11	7180	-1.050804600000	7180
11	51	1	0.004150200000	1
12	51	1	-1.542114000000	1
13	51	1	-0.000000000000	1
14	51	1	-0.01007440012011	1
15	51	2	-0.100000000000	2
16	51	1	-0.100000000000	1
17	51	1	0.201247600000	1
18	51	1	0.200542400000	1
19	40	4	-0.200000000000	4
20	11	4	-0.010000000000	4
21	10	2	-0.010000000000	2
22	21	1	-0.010000000000	1
23	24	1	-0.000000000000	1
24	21	1	-0.010000000000	1
25	20	1	0.010000000000	1
26	21	1	0.010000000000	1
27	21	1	0.010000000000	1
28	20	1	0.010000000000	1
29	24	1	0.000000000000	1
30	31	1	0.000000000000	1
31	31	1	0.000000000000	1
32	31	1	0.000000000000	1
33	31	1	0.000000000000	1
34	30	4	0.100000000000	4
35	30	1	0.000000000000	1
36	30	1	0.000000000000	1
37	30	2	-0.100000000000	2
38	40	1	-0.000000000000	1
39	40	1	0.100000000000	1
40	41	1	-0.000000000000	1
41	40	4	-0.100000000000	4
42	41	1	-0.000000000000	1
43	40	4	-0.100000000000	4

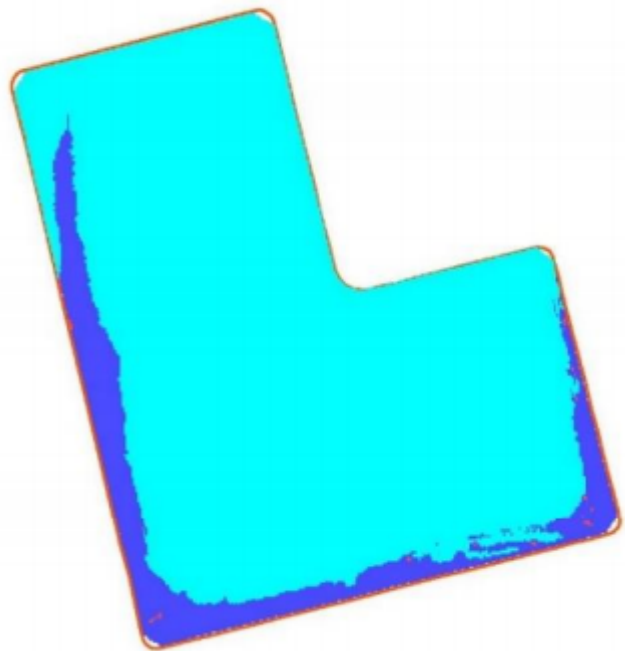


Рисунок 2.12. Розрахунок об'єму стану сміттєзвалищ

Застосування дистанційних методів дослідження стану сміттєзвалищ ТПВ є ефективним інструментом їх моніторингу. На прикладі Здолбунівського сміттєзвалища ТПВ (Рівненська область, Україна) показано інформативність

дешифрування його карт і прилеглих ділянок за даними знімання БПЛА. Метод отримання аерофотознімків та їх подальша обробка методами фотограмметрії є найбільш ефективним способом отримання геопросторової інформації. Основним його плюсом являється мінімізація польових робіт та швидкість отримання інформації.

2.3. Моніторингові дослідження в активний період функціонування полігонів ТПВ

2.3.1. Моніторинг захоронення твердих побутових відходів. Для високоточної планово-висотної прив'язки матеріалів знімання рекомендується використовувати тахеометри, теодоліти або ГНСС-приймачі у режимі RTK. Отримані результати дозволяють створити робочі карти захоронення відходів, які є інструментом контролю параметрів технологічного процесу — довжини, ширини та висоти ущільненого шару. Зокрема, встановлено, що ущільнений шар ТПВ має досягати 2,0–2,5 м, після чого виконується його ізоляція (глиною, подрібненими будівельними матеріалами тощо).

Моніторинг полігону має здійснюватися не рідше двох разів у міжвегетаційний період (ранньою весною та пізньою осінню), коли рослинність мінімальна, що дозволяє уникнути перекручення ЦМР.

Поряд з аерозніманням доцільно також застосовувати:

- ГНСС-спостереження у режимі RTK;
- тахеометричне знімання;
- наземне лазерне сканування (НЛС) — зокрема для оцінки ступеня ущільнення відходів, яке виконують спеціалізовані машини (трактори, бульдозери).

Періодичність таких вимірювань має бути гнучкою — від кількох разів на добу до одного разу на місяць, залежно від інтенсивності надходження відходів.

На основі поєднання БПЛА-знімання та архівних картографічних матеріалів можливо ідентифікувати зони з максимальною висотою складування, що є важливим для планування встановлення систем дегазації полігону.

Крім того, побудова тривимірної моделі полігону (3D) на основі фотограмметричних даних забезпечує:

- підвищену візуальну інформативність;
- можливість аналізу ухилів, експозицій, профілів;
- точне моделювання геометрії відходів у просторі.

Таким чином, часте повторне знімання БПЛА дозволяє сформувати актуальну базу даних, що сприяє не лише контролю експлуатації, а й продовженню життєвого циклу полігону через оптимізацію технологічних рішень і підвищення безпеки його функціонування.

2.3.2. Моніторинг температурних режимів. Важливим напрямом у системі екологічного моніторингу полігонів твердих побутових відходів є контроль температурних режимів, що дозволяє своєчасно виявляти аномальні ділянки з підвищеною температурою, потенційно небезпечні з точки зору виникнення пожеж або глибинного тління відходів. Отримання даних щодо температури поверхні полігону можливе за допомогою:

- аеро- та космічного знімання в інфрачервоному діапазоні (наприклад, на основі даних сенсорів типу TIRS на супутниках Landsat або аналогів Sentinel);
- тепловізійного обстеження з БПЛА або наземних мобільних платформ;
- встановлення стаціонарних тепловізорів на найбільш вразливих або потенційно небезпечних ділянках.

Моніторинг температур має критичне значення в літній період (травень – серпень), коли ризик займання відходів істотно зростає. У цей період доцільно використовувати інтенсивне аеро- або космознімання для виявлення температурних аномалій, які можуть бути свідченням початкової стадії пожежі або глибинного тління сміття. Упродовж року рекомендовано застосовувати

стаціонарні тепловізори, які забезпечують безперервний контроль критичних точок на території полігону.

Не менш важливою є постексплуатаційна фаза функціонування полігону, коли, попри завершення приймання відходів, ризик самозаймання у товщі сміттєвого тіла залишається високим. У таких умовах моніторинг температурного режиму на основі космічного знімання мінімум двічі на рік (весна–осінь) є обґрунтованою вимогою до системи безпеки.

Практична цінність отриманих даних полягає в можливості:

- оперативного виявлення критичних температурних зон;
- запобігання екологічним катастрофам та масштабним пожежам;
- розробки комплексних регламентів і нормативних документів для служб ДСНС, місцевих адміністрацій, експлуатантів полігонів ТПВ;
- оптимізації рекультиваційних заходів та проєктування майбутніх полігонів з урахуванням виявлених температурних закономірностей.

Застосування температурного моніторингу в системі геоінформаційного аналізу полігонів ТПВ дозволяє забезпечити превентивну модель реагування та підвищити екологічну безпеку навколишніх територій.

2.3.3. Моніторинг утворення біогазу та фільтрату. В активний період експлуатації полігону ТПВ одним із ключових завдань екологічного та технічного контролю є моніторинг процесу захоронення відходів. У цьому контексті застосування БПЛА як аерофотознімальної платформи має ряд суттєвих переваг, зокрема можливість оперативного отримання ортофотопланів і ЦМР із високою просторовою деталізацією. Підприємству-експлуатанту полігону доцільно проводити попереднє рекогносрування території з урахуванням умов існуючих урбанізованих систем. Результатом має стати створення надійної геодезичної основи, що включає систему опорних пунктів, розміщених з урахуванням:

- геоморфологічних та геологічних умов (наявність осідань, нестабільність ґрунтів);

- потенційного розширення меж полігону (будівництво нових об'єктів інфраструктури, відведення додаткових земель);

- змін ландшафту внаслідок ущільнення відходів або техногенних чинників.

У межах активного та постексплуатаційного періодів функціонування полігонів твердих побутових відходів важливо здійснювати комплексний моніторинг утворення біогазу та фільтрату. Одним із ключових заходів є облаштування мережі свердловин для відкачування біогазу, що не лише знижує пожежонебезпечність полігону, а й створює передумови для отримання додаткових матеріальних ресурсів. Щоденні обсяги утворення біогазу повинні фіксуватися в базі даних полігону, що забезпечить їх оперативний облік та подальший аналіз. Важливою складовою геоінформаційного моніторингу є також спостереження за озерами фільтратів, зокрема визначення площі їх дзеркала за допомогою супутникового знімання. Отримані дані необхідно інтегрувати до ГІС-системи для оцінки стану накопичувача фільтрату та прогнозування змін його об'єму. Частота таких спостережень має відповідати інтенсивності утворення фільтрату, кількості атмосферних опадів і особливостям системи збору, але не може бути меншою ніж один раз на місяць. Для забезпечення оперативного реагування доцільно впровадити щоденні наземні спостереження, адже надмірне накопичення фільтрату створює небезпеку підвищеного гідростатичного тиску на дамбу, що може призвести до її деформації або прориву. З метою забезпечення надійності гідротехнічних споруд рекомендується доповнювати температурні та гідрологічні спостереження інженерно-геодезичним моніторингом дамб, що дозволить комплексно оцінювати їхню технічну стабільність і запобігати аварійним ситуаціям.

2.4. Моніторинг ґрунтів на полігоні твердих побутових відходів

2.4.1. Відбір та підготовка проб ґрунту для аналізу. Контроль забруднення ґрунтів і оцінка їх якісного стану як у природних, так і в порушених умовах передбачає ретельно організований відбір проб. У межах дослідження,

проведеного на Здолбунівському полігоні твердих побутових відходів, хімічний аналіз ґрунтів здійснювався у період з 10 жовтня 2009 року до 25 квітня 2010 року. Відбір проб проводився з п'яти визначених точок, які були обрані з урахуванням рельєфу, неоднорідності ґрунтового покриву, кліматичних умов, вертикальної структури ґрунту, а також особливостей поширення забруднюючих речовин. Проби відбиралися в епіцентрі полігону, біля обвідного каналу, на відстані 50 та 300 метрів від його меж, а також поруч з адміністративною будівлею на виїзді з території. Особлива увага приділялася оцінці поширення неорганічних форм Нітрогену та Фосфору, а також важких металів за межі сміттєзвалища, оскільки нормативи гранично допустимих концентрацій (ГДК) для деяких з них відсутні.

Пробні майданчики закладалися згідно з вимогами ГОСТ 17.4.3.01-83 на ділянках із однорідною ґрунтовою та рослинною структурою. Точкові проби відбиралися ножем, шпателем або ґрунтовим буром за характерними генетичними горизонтами. Для хімічного аналізу формувалася об'єднана проба масою не менше 1 кг, що складалася щонайменше з п'яти точкових проб. Обробка в лабораторії передбачала очищення від сторонніх включень (каміння, коріння, скло, органічні залишки), подрібнення, просіювання через сито з діаметром отворів 1 мм та висушування до повітряно-сухого стану.

Паралельно з відбором проб здійснювалося візуальне обстеження полігону, за результатами якого встановлено численні порушення екологічних норм і вимог природоохоронного законодавства. Зокрема, повна відсутність огорожі та охорони сприяє безконтрольному засміченню прилеглих територій. Процеси захоронення відходів проводяться без дотримання проєктних рішень — відходи укладаються з низькою щільністю, без роздільного збирання та сортування. Здійснюється несанкціоноване захоронення відходів, зокрема автомобільних шин, нафтопродуктів, ПЕТ-пляшок, залишків деревообробної продукції, що є порушенням вимог Закону України «Про відходи».

Особливе занепокоєння викликає відсутність систем газовідведення, що створює небезпеку займання чи вибуху метану та інших летких сполук. Не проводиться штучне вапнування ґрунтів, унаслідок чого відбувається їх

закислення, що сприяє підвищенню мобільності важких металів. Значне забруднення атмосфери спричиняється викидами парникових газів, що впливають на здоров'я населення.

Полігон також становить епідеміологічну небезпеку через наявність патогенних мікроорганізмів, гризунів та комах, які є переносниками інфекційних захворювань. Не менш важливою проблемою є утворення фільтрату — складної, токсичної рідини з різким запахом, яка є результатом розкладу органічних речовин, окислення металів, а також проникнення атмосферних опадів. Особливо інтенсивно фільтрат утворюється в теплий період (через дощі) і в зимовий період (через танення снігу та тепло від розкладу органіки). Фільтрат забруднює ґрунти й довкілля, особливо внаслідок його пеліву за відсутності належної системи збору.

З огляду на виявлені порушення, полігон ТПВ у Здолбунові потребує невідкладної модернізації систем управління відходами, а також реалізації комплексу заходів з покращення екологічної безпеки об'єкта.

2.4.2. Визначення рухомих форм нітрит-іонів у ґрунті за умов накопичення на його поверхні ТПВ. Основними показниками, що дозволяють оцінити екологічний вплив твердих побутових відходів на навколишнє середовище, є концентрації рухомих форм нітрит-, нітрат- та фосфат-аніонів у ґрунтовому покриві. Саме ці індикатори слугують маркерами забруднення та дозволяють простежити як міграцію забруднюючих речовин, так і ступінь антропогенного навантаження на ґрунтову екосистему в зоні впливу полігону.

Для оцінки рівня забруднення ґрунтів у зоні впливу полігону ТПВ було побудовано два графіки, що відображають просторовий розподіл концентрацій рухомих форм нітрит- та нітрат-аніонів.

Перший графік демонструє зміну вмісту нітрит-аніонів (NO_2^-) у ґрунті залежно від відстані від епіцентру полігону. Найвищу концентрацію — 4,8 мг/кг — зафіксовано безпосередньо на тілі полігону (Точка 1). Із віддаленням концентрація поступово зменшується: біля обвідного каналу — 3,6 мг/кг, на відстані 50 м — 2,9 мг/кг, 300 м — 1,7 мг/кг,

а біля адміністративної будівлі – 1,2 мг/кг. Така динаміка свідчить про локальне джерело забруднення та поступове зменшення його впливу з віддаленням.

Другий графік ілюструє просторовий розподіл нітрат-аніонів (NO_3^-) у ґрунтах. Найбільше значення (39 мг/кг) також спостерігається на тилі полігону. На інших точках спостереження концентрація зменшується: 33 мг/кг (біля обвідного каналу), 27 мг/кг (50 м), 21 мг/кг (300 м), 16 мг/кг (адмінбудівля). Це вказує на аналогічну тенденцію міграції, характерну для сполук азоту.

Таким чином, обидва графіки підтверджують негативний вплив полігону ТПВ на навколишнє середовище, що проявляється у високій концентрації неорганічних форм азоту в безпосередній близькості до джерела забруднення, а також наявності їхнього поширення за межі полігону.

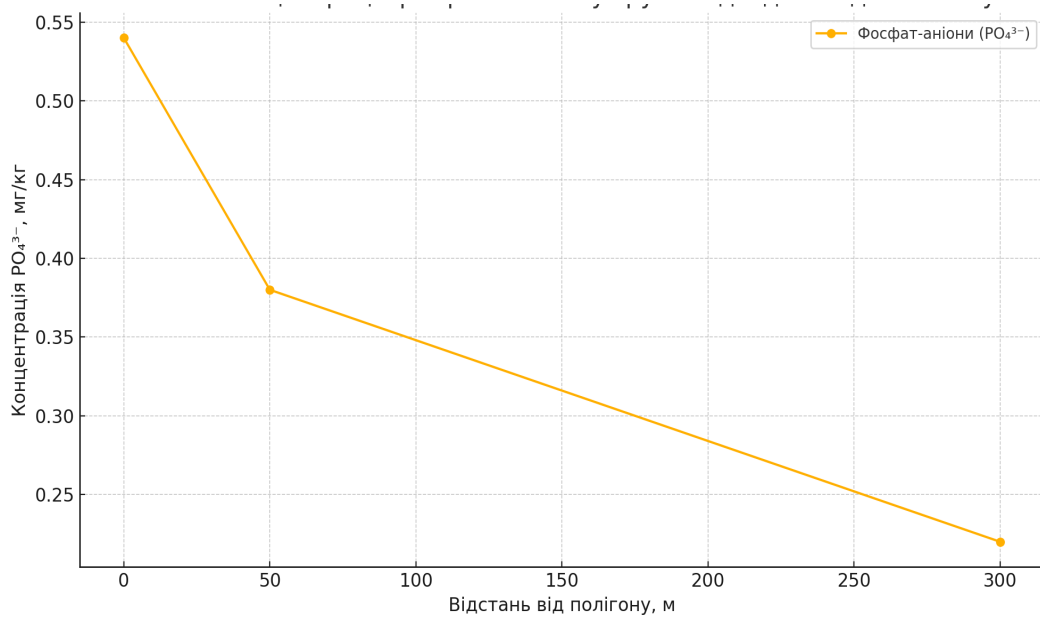


Рисунок 2.13. Залежність концентрації фосфат-аніонів у ґрунті від відстані до полігону твердих побутових відходів

На графіку 2.13. зображено залежність концентрації фосфат-аніонів у ґрунті від відстані до полігону твердих побутових відходів. Спостерігається чітка тенденція до зменшення концентрації PO_4^{3-} з віддаленням від джерела забруднення: максимальне значення 0,54 мг/кг фіксується в епіцентрі полігону, тоді як на відстані 300 м концентрація

знижується до 0,22 мг/кг. Це свідчить про локальний характер фосфатного забруднення, зумовленого захороненням органічних та неорганічних відходів

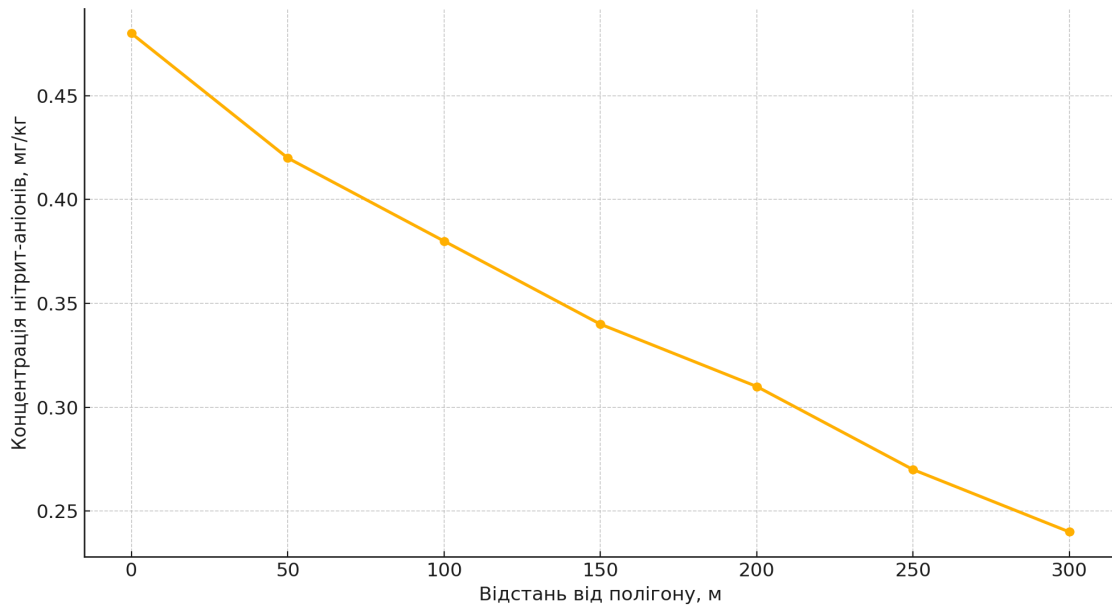


Рисунок 2.14. Зменшення концентрації нітрит-аніонів у ґрунті зі збільшенням відстані від епіцентру полігону ТПВ

На графіку 2.14 зображено зменшення концентрації нітрит-аніонів у ґрунті зі збільшенням відстані від епіцентру полігону ТПВ. Найвищі значення (0,48 мг/кг) зафіксовано безпосередньо на полігоні, після чого простежується чітка тенденція до зниження — на відстані 300 м рівень забруднення зменшується майже вдвічі. Це свідчить про локальний характер джерела забруднення, що пов'язаний з процесами розкладу органічних речовин у тілі сміттєзвалища.

З отриманих результатів простежується аналогічна залежність у динаміці концентрацій нітрат-аніонів, як і у випадку з нітрит-аніонами. Найвищий вміст нітратів зафіксовано в центрі полігону, що вказує на активні процеси розкладу органічної речовини в межах сміттьового тіла. У міру віддалення від епіцентру полігону спостерігається поступове зниження концентрацій у ґрунтах, що свідчить про радіальне поширення забруднення. Така закономірність підтверджує локальність джерела та дає змогу встановити межі екологічного впливу полігону на прилеглі території.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Виконано комплекс польових та камеральних робіт із використанням БПЛА, створено ортофотоплан та цифрову модель рельєфу полігону ТПВ для отримання оперативної геопросторової інформації.
2. На основі експериментальних досліджень доведено, що використання GRID-моделей для визначення об'єму полігонів має відносну похибку від 8% до 12%, тоді як метод Triangulation with Linear Interpolation (TLI) забезпечує похибку в межах 1%, що свідчить про складність рельєфу досліджуваного об'єкта.
3. Використання TIN-моделей дозволяє досягнути більш високої точності обчислення об'ємів завдяки складним математичним алгоритмам триангуляції Делоне.
4. Запропоновано комбіновану методику створення великомасштабного топографічного плану полігону ТПВ у масштабі 1:500 з перерізом рельєфу 0,5 м, що є основою для проєктування рекультиваційних заходів.
5. Розроблено методику математичного визначення об'ємів складних за конфігурацією тіл рельєфу з використанням квадратурних формул з граничною відотною похибкою 6,7%.
6. Отримано та перевірено математичні формули для обчислення об'ємів за допомогою TIN-моделей, що підтверджує їх правильність та можливість використання у практичних застосуваннях для моделювання складних рельєфів полігонів ТПВ.

РОЗДІЛ 3. ГЕОІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЗДОЛБУНІВСЬКОГО ПОЛІГОНУ

У розділі проведено комплексний аналіз використання інформаційних технологій для моніторингу та екологічного моделювання Здолбунівського полігону ТПВ. Особливу увагу приділено можливостям ГІС для багаторівневої оцінки стану довкілля, застосуванню супутникового моніторингу температурних аномалій і деградації ландшафтів, а також побудові прогнозних сценаріїв розвитку об'єкта з урахуванням даних штучного інтелекту. Порівняльний аналіз показує, що використання таких підходів відповідає найкращим міжнародним практикам і відкриває перспективи для переходу України до моделі сталого управління полігонами ТПВ відповідно до європейських екологічних стандартів. Таким чином, розділ поєднує результати практичних досліджень із теоретичним аналізом сучасних світових технологій у сфері екологічного моніторингу, створюючи ґрунт для подальшого розвитку національної екологічної політики та цифрової трансформації управління відходами. Детально розглянуто використання ГІС, технологій ДЗЗ, автоматизованих сенсорних мереж і методів цифрового картографування для оцінки екологічного стану ґрунтів, водних ресурсів, атмосферного повітря та біорізноманіття. Показано, як інтеграція даних з різних джерел у єдиному інформаційному середовищі забезпечує ефективний просторово-часовий моніторинг змін, спричинених діяльністю полігону, та сприяє своєчасному реагуванню на виявлені екологічні загрози. Матеріали розділу ґрунтуються як на власних експериментальних дослідженнях, так і на узагальненні кращих міжнародних практик застосування інформаційних технологій у сфері моніторингу та управління полігонами ТПВ. Це дозволяє сформулювати цілісне бачення потенціалу цифровізації екологічного моніторингу та обґрунтувати напрями розвитку сучасних систем екологічної безпеки в Україні.

3.1. Інформаційні технології аналізу впливу на довкілля Здолбунівського полігону побутових відходів

3.1.1. Використання інформаційних технологій для моніторингу та контролю забруднення ґрунтів. Одним із ключових інструментів є геоінформаційні системи (ГІС), які дозволяють збирати, обробляти та візуалізувати просторові дані щодо рівня забруднення ґрунтів (рис. 3.1.). За допомогою ГІС можна створювати карти розподілу важких металів, відстежувати динаміку змін у часі, моделювати вплив техногенних чинників на природне середовище, а також визначати зони ризику для сільськогосподарських земель і житлових масивів. Здолбунівський полігон твердих побутових відходів є одним із ключових об'єктів накопичення сміття в регіоні, який здійснює постійний негативний вплив на навколишнє середовище. Однією з найбільш критичних проблем є забруднення ґрунтів, що викликане як прямими викидами із полігону, так і вторинними процесами – атмосферним переносом важких металів, фільтрацією забруднюючих речовин у підземні води та поверхневим стоком у сільськогосподарські угіддя.

Результати аналізу елементного складу ґрунтів у зоні впливу полігону свідчать про підвищену концентрацію важких металів, таких як цинк (Zn), кадмій (Cd), стронцій (Sr) і марганець (Mn). Це не лише знижує родючість ґрунтів і порушує природну мікрофлору, але й становить загрозу для здоров'я населення через накопичення токсичних елементів у харчовому ланцюгу. Особливо небезпечним є кадмій, який має канцерогенні властивості. В умовах зростаючого антропогенного навантаження, важливу роль у системі контролю й управління екологічною безпекою відіграють інформаційні технології.

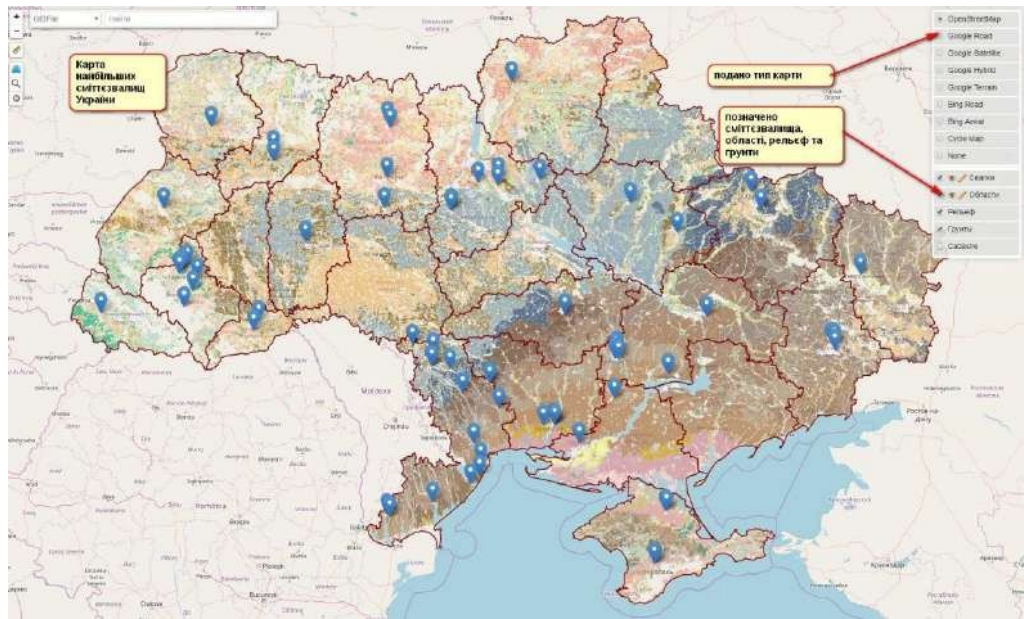


Рисунок 3.1. Карта ґрунтів і сміттєзвалищ України

Їх застосування дозволяє проводити багаторівневий моніторинг, прогнозування та оптимізацію заходів щодо реабілітації забруднених територій. Ще одним потужним інструментом є ДЗЗ, що забезпечує отримання актуальних супутникових даних, зокрема в інфрачервоному та мультиспектральному діапазонах. Це дозволяє оперативно виявляти ознаки деградації ґрунтового покриву, вологозміни, вторинне забруднення та інші індикатори техногенного впливу.

Системи автоматизованого аналізу даних, зокрема з використанням методів штучного інтелекту і машинного навчання, дають можливість обробляти великі обсяги екологічної інформації, виявляти приховані закономірності та прогнозувати міграцію забруднюючих речовин у середовищі. Такі моделі здатні враховувати метеоумови, геоморфологічні особливості та інші фактори, що впливають на динаміку поширення токсичних елементів. Також активно впроваджуються інтерактивні платформи екологічного моніторингу, які дають змогу органам місцевої влади, науковцям та громадськості в реальному часі відстежувати стан довкілля на основі зібраних з полігону та прилеглих територій даних. Це підвищує рівень екологічної прозорості та дозволяє оперативно

реагувати на загрози. На основі зібраної інформації реалізуються практичні заходи з реабілітації територій, серед яких:

- впровадження бар'єрних технологій з використанням геомембран для обмеження проникнення фільтрату у ґрунт і підземні води;
- застосування методів фіторемедіації, зокрема висадження рослин-аккумуляторів (соняшник, гірчиця), які здатні поглинати важкі метали;
- хімічна рекультивация з використанням сорбентів (цеоліти, активоване вугілля) для зменшення мобільності токсичних сполук;
- створення захисних лісосмуг, що зменшують пилове забруднення та стабілізують мікроклімат прилеглих зон.

Таким чином, інтеграція інформаційних технологій у сферу екологічного управління дозволяє значно підвищити ефективність моніторингу, забезпечити оперативне реагування на екологічні загрози та формувати науково обґрунтовані стратегії сталого управління відходами. Це відкриває нові можливості для збереження природного середовища та захисту здоров'я населення у зоні впливу Здолбунівського полігону ТПВ.

Здолбунівський полігон побутових відходів є одним із ключових об'єктів накопичення ТПВ у регіоні, що суттєво впливає на навколишнє середовище. Основними екологічними проблемами, пов'язаними з його функціонуванням, є забруднення ґрунтів, поверхневих і підземних вод, атмосфери, а також порушення екологічного балансу прилеглих територій.

Атмосферний перенос – поширення важких металів разом із пилом та газовими викидами, що утворюються внаслідок хімічних реакцій у відходах. Поверхневий стік – вимивання забруднюючих речовин під час атмосферних опадів у прилеглі водойми та сільськогосподарські угіддя.

3.1.2. Роль інформаційних технологій у контролі впливу на водні ресурси. У сучасних умовах забезпечення ефективного моніторингу та управління екологічними загрозами неможливе без використання інформаційних технологій. Зокрема, застосування таких інструментів, як ГІС, ДЗЗ та автоматизовані системи

обробки екологічних даних, є критично важливим для оперативного виявлення, аналізу та реагування на джерела забруднення.

ГІС-технології дозволяють створювати багатопланові карти просторового розподілу забруднення, моделювати шляхи міграції забруднюючих речовин та визначати найбільш вразливі до забруднення ділянки. Здолбунівський полігон побутових відходів є значним джерелом екологічного навантаження на водні ресурси регіону. Його діяльність спричиняє постійне забруднення як ґрунтових, так і поверхневих вод, що пов'язано з інфільтрацією токсичних речовин у водоносні горизонти та поверхневий стік із забруднених територій, особливо у періоди інтенсивних атмосферних опадів. Виявлено значне перевищення гранично допустимих концентрацій важких металів — таких як цинк, марганець, кадмій і стронцій — у водах, розташованих у межах 1,5–2 км від полігону. Це свідчить про активну міграцію токсичних елементів, яка загрожує питному водопостачанню та цілісності водних екосистем. Крім того, високий вміст амонію, фосфатів, нітратів і органічних речовин у дренажних водах полігону сприяє евтрофікації водойм, зниженню вмісту розчиненого кисню та загибелі водної фауни.

Для запобігання подальшому погіршенню екологічної ситуації доцільним є широке впровадження інформаційних технологій. Насамперед, ГІС та технології ДЗЗ дозволяють здійснювати просторово-часовий моніторинг динаміки забруднення, моделювати шляхи міграції фільтрату, прогнозувати зони ризику та вчасно виявляти критичні зміни у складі водних об'єктів. Поєднання результатів польових гідрохімічних досліджень із супутниковими знімками та геоінформаційними базами даних дає змогу формувати інтерактивні карти розповсюдження забруднюючих речовин і розробляти сценарії реагування в реальному часі. Автоматизовані сенсорні системи, підключені до ГІС, забезпечують безперервне спостереження за якістю води, включно з вимірюванням рН, електропровідності, температури, концентрацій важких металів та органічного забруднення.

На основі таких даних можна обґрунтовано реалізовувати природоохоронні заходи, зокрема створення ефективних систем збору та очищення фільтрату з використанням біологічних та хімічних методів знезараження, укріплення гідроізоляційних бар'єрів полігону сучасними геомембранами, облаштування біофільтрів та буферних зон із рослинністю, здатною поглинати токсичні речовини. Крім того, завдяки інформаційним технологіям можна здійснювати довгострокове екологічне прогнозування, визначати залежності між сезонними коливаннями вологості та рівнем забруднення, а також оптимізувати інвестиційні рішення у сфері модернізації полігону й управління водними ресурсами. Такий підхід забезпечує системне бачення проблеми та сприяє покращенню екологічної безпеки регіону загалом.

Результати досліджень підтверджують, що забруднення ґрунтів навколо Здолбунівського полігону побутових відходів має тенденцію до поступового розповсюдження через фізико-хімічні процеси міграції токсичних речовин. Основні шляхи поширення включають:

- інфільтрацію
- проникнення токсичних сполук у нижні горизонти ґрунту та подальше потрапляння у ґрунтові води.

Здолбунівський полігон побутових відходів є джерелом забруднення водних ресурсів через інфільтрацію токсичних речовин у ґрунтові та поверхневі води. Основними факторами негативного впливу є проникнення фільтрату, що містить органічні та неорганічні забруднювачі, міграція важких металів (Zn, Mn, Cd, Sr), підвищена мінералізація вод та зміни кислотності, що негативно впливає на якість питної води й екосистеми. Моніторинг вод поблизу полігону виявив перевищення гранично допустимих концентрацій важких металів у 3-5 разів, зміни рН та високий рівень органічного забруднення. Для мінімізації впливу необхідно впровадити гідроізоляцію полігону, систематичний моніторинг із використанням ГІС-технологій, очищення фільтрату через будівництво очисних споруд, а також створення буферних зон із рослинністю, здатною поглинати забруднюючі речовини. Застосування цих заходів дозволить значно знизити негативний вплив

полігону на водні ресурси та підвищити екологічну безпеку регіону. У зоні впливу полігону зафіксовано підвищені концентрації забруднюючих речовин у підземних та поверхневих водах. Аналіз гідрогеологічної ситуації вказує на проникнення фільтрату у водоносні горизонти, що становить загрозу для якості питної води в регіоні. Виявлено закономірності поширення забруднення у залежності від сезонних змін вологості та рівня опадів. Додатково, негативний вплив Здолбунівського полігону побутових відходів на водні ресурси проявляється у зміні гідрогеологічного режиму регіону. Інфільтрація забруднюючих речовин у ґрунтові води спричиняє забруднення водоносних горизонтів, що може призводити до потрапляння токсичних елементів у джерела питного водопостачання. Встановлено, що в межах 1,5–2 км від полігону концентрація важких металів у підземних водах перевищує нормативні показники, що свідчить про активну міграцію забруднюючих речовин.

Крім того, поверхневі води, особливо в дощові періоди, піддаються вторинному забрудненню через стік із території полігону. Дренажні води полігону можуть містити високі концентрації амонію, нітратів, фосфатів та органічних сполук, що сприяє евтрофікації водних об'єктів, зниженню вмісту розчиненого кисню та загибелі водної фауни.

Для запобігання подальшому забрудненню необхідно реалізувати комплекс заходів, зокрема:

- будівництво ефективної системи збору та очищення фільтрату, що включає біологічні та хімічні методи знезараження.

- укріплення ізоляційних бар'єрів полігону, використання сучасних геомембран для запобігання інфільтрації забруднюючих речовин у підземні води.

- реалізація системи моніторингу з використанням ГІС- та ДЗЗ-технологій, що дозволить оперативно відстежувати динаміку забруднення та вчасно реагувати на екологічні ризики.

- створення штучних біофільтрів на основі природних сорбентів та біологічних матеріалів для очищення стоків перед їх потраплянням у водойми.

– залучення екологічних програм та інвестицій у модернізацію полігону для впровадження технологій переробки та утилізації відходів, що дозволить зменшити утворення шкідливих викидів.

Застосування цих заходів дозволить значно знизити рівень забруднення водних ресурсів, покращити екологічний стан прилеглих територій та запобігти негативному впливу на здоров'я населення.

3.1.3. Роль інформаційних технологій у контролі впливу на атмосферу.

Здолбунівський полігон побутових відходів чинить суттєвий негативний вплив на атмосферне повітря регіону, зокрема через безперервне вивільнення парникових газів, таких як метан (CH_4) і діоксид вуглецю (CO_2). Ці гази утворюються в процесі анаеробного розкладу органічних компонентів твердих побутових відходів і сприяють глобальному потеплінню, локальному забрудненню повітря та формуванню парникового ефекту. Крім того, викиди летких органічних сполук та інших забруднювачів створюють неприємні запахи, що суттєво знижує якість життя місцевих жителів і може призводити до респіраторних та алергічних захворювань. Атмосферне забруднення також супроводжується змінами у рослинності, що виявляється у деградації зелених насаджень, зниженні біорізноманіття та порушенні трофічних зв'язків у екосистемах. Полігон стає бар'єром для природної міграції тварин і створює ізольовані ділянки з порушеною екологічною структурою.

Для якісного аналізу та зменшення негативного атмосферного впливу полігону доцільно застосовувати сучасні інформаційні технології. Зокрема, використання ГІС дозволяє просторово відстежувати зони з підвищеними концентраціями шкідливих викидів, проводити моделювання розсіювання забруднюючих речовин у повітрі та формувати карти екологічного ризику. Інтеграція даних ГІС з результатами ДЗЗ дає змогу оперативно виявляти зміни у стані рослинного покриву, визначати зони деградації та оцінювати динаміку змін у часі. Високоточні супутникові знімки використовуються для аналізу

просторового поширення пилу, аерозолів та оцінки температурної аномалії, пов'язаної з розкладанням органіки.

Важливу роль у моніторингу атмосферного впливу полігону відіграють автоматизовані сенсорні системи, які в режимі реального часу збирають дані про концентрації шкідливих газів, температурні показники, вологість повітря та метеорологічні умови. Завдяки таким системам можна не лише фіксувати фактичні рівні забруднення, але й будувати моделі для прогнозування потенційних сценаріїв погіршення якості повітря, зокрема під час несприятливих погодних умов або перевантаження полігону. Застосування математичних моделей атмосферного розсіювання викидів у поєднанні з даними супутникового спостереження та ГІС-аналізу дозволяє планувати природоохоронні заходи з урахуванням зон ризику для населення та навколишнього середовища.

Таким чином, використання ГІС, ДЗЗ, автоматизованих систем моніторингу та прогнозного моделювання є ключовим елементом у системі контролю за впливом Здолбунівського полігону на атмосферу. Ці інструменти дозволяють приймати обґрунтовані рішення щодо зменшення викидів, підвищення екологічної безпеки та збереження якості повітря в зоні впливу об'єкта.

Комплексне впровадження інформаційних технологій у моніторинг атмосферного впливу полігону побутових відходів дозволяє не лише виявляти наслідки вже існуючого забруднення, а й ефективно прогнозувати його подальший розвиток та запобігати екологічним катастрофам. Зокрема, моделювання сценаріїв розсіювання забруднюючих речовин у повітрі на основі метеорологічних даних (швидкість і напрямок вітру, температура, вологість) у ГІС-середовищі дозволяє визначити потенційні зони впливу на населення та природу. Такий підхід дає змогу своєчасно вживати заходів щодо обмеження доступу до небезпечних територій, зміни маршрутів руху транспорту або проведення локальних рекультиваційних робіт. Також, інтеграція автоматизованих метеорологічних станцій і газоаналізаторів у систему моніторингу дає змогу отримувати достовірні дані про склад повітря з точних координатних прив'язок. Це відкриває можливість для створення багаторівневої цифрової платформи екологічного нагляду, яка

включатиме базу даних, аналітичні інструменти, модулі візуалізації та системи сповіщення для органів місцевого самоврядування, екологічних служб і громадськості. Такі рішення дозволяють здійснювати не лише наукову оцінку стану довкілля, а й брати участь у процесах екологічного планування та розробки програм адаптації до змін клімату.

У перспективі ефективна реалізація подібної цифрової екосистеми передбачає створення екологічного дашборду, що поєднуватиме геоінформаційні шари з даними ДЗЗ, результатами натурних вимірювань і прогнозами забруднення. Цей дашборд стане ключовим інструментом для прийняття управлінських рішень, зокрема щодо локалізації джерел викидів, контролю за технічним станом полігону, а також для визначення пріоритетних територій для рекультивації та відновлення. Таким чином, сучасні інформаційні технології є невід'ємною складовою екологічного менеджменту, що забезпечує не лише контроль за негативним впливом полігону побутових відходів на атмосферу, але й формує основу для сталого розвитку території, зменшення екологічного навантаження та покращення якості життя населення у зоні впливу.

3.1.4. Моделювання екологічних процесів Здолбунівського полігону у ГІС-середовищі ландшафтів та біорізноманіття. Довготривала експлуатація полігону призводить до деградації природних ландшафтів та скорочення площі природних екосистем. Вплив на флору та фауну проявляється у скороченні популяцій деяких видів, зміні біоценозів та втраті місць проживання рідкісних видів тварин і рослин. Здолбунівський полігон побутових відходів справляє суттєвий негативний вплив на ландшафти та біорізноманіття навколишніх територій. Формування антропогенного рельєфу, накопичення великої кількості твердих побутових відходів і зміна природного землекористування призводять до деградації ландшафтної структури. Полігон виступає як штучна перешкода у природному середовищі, що розриває екологічні зв'язки, змінює характер водного стоку та мікроклімат прилеглих територій. Його функціонування спричиняє трансформацію природних екосистем, витіснення аборигенних видів, зниження

біорізноманіття та порушення трофічних зв'язків. Особливо помітним є вплив на флору та фауну: спостерігаються зміни у видоутворенні, зниження чисельності чутливих до антропогенного тиску видів, а також поява синантропних організмів. Полігон також створює бар'єр для міграційних маршрутів диких тварин, сприяє фрагментації середовищ існування та зміні екологічної ролі ландшафту. У цьому контексті інформаційні технології відіграють ключову роль у вивченні, оцінці та зменшенні негативного впливу. Використання ГІС-технологій та методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) дозволяє фіксувати динаміку змін ландшафтного покриву, просторово-часове поширення деградованих ділянок та виявляти зони зниження біорізноманіття. Аналіз супутникових знімків у різних спектральних діапазонах надає змогу оцінювати стан рослинного покриву, виявляти ділянки з ослабленою вегетацією, і навіть прогнозувати майбутні зміни під впливом полігону.

Моделювання екологічних процесів у ГІС-середовищі допомагає візуалізувати та передбачати шляхи міграції забруднень, можливі траєкторії зміни середовищ існування видів, а також розробляти стратегії формування буферних зон та екологічних коридорів. Автоматизовані системи екологічного моніторингу, інтегровані з ГІС, дають змогу в реальному часі відстежувати зміни в біотичній складовій екосистеми, реагувати на критичні порушення та забезпечувати збереження ландшафтного різноманіття. Таким чином, застосування ГІС, ДЗЗ та автоматизованих аналітичних платформ є основою для ефективного управління природним середовищем довкола полігону, мінімізації його впливу на ландшафти та збереження біорізноманіття регіону. Ці технології дають змогу перейти від реактивного до проактивного екологічного управління, забезпечуючи сталий розвиток територій навіть у присутності об'єктів із підвищеним техногенним навантаженням.

3.2. Інтегровані технології будівництва полігону твердих побутових відходів

3.2.1. Проектування полігонів ТПВ в Україні на основі інформаційних технологій. Проектування полігонів ТПВ в Україні дедалі більше інтегрується з сучасними інформаційними технологіями, що дає змогу підвищити ефективність планування, безпеку експлуатації та мінімізувати екологічні ризики. Ключову роль у цьому процесі відіграють ГІС, ДЗЗ, цифрове моделювання рельєфу та геоекологічного середовища, а також автоматизовані системи підтримки прийняття рішень. ГІС-технології забезпечують просторовий аналіз оптимального розміщення полігонів з урахуванням рельєфу місцевості, гідрологічних умов, близькості до населених пунктів, природоохоронних територій, інфраструктури та інших чинників. ДЗЗ дає змогу швидко отримувати оновлену інформацію про зміни земного покриву, стан навколишнього середовища, виявляти непридатні для будівництва ділянки та слідкувати за потенційно небезпечними процесами, такими як ерозія, зсуви чи підтоплення. На етапі проектування застосовуються ЦМР, які дозволяють точно моделювати морфологію полігону, розраховувати обсяг потенційного навантаження на територію, моделювати стік фільтрату та накопичення газів. Інформаційні технології також дозволяють змоделювати сценарії розвитку полігону в динаміці — з урахуванням прогнозованих обсягів відходів, кліматичних змін та антропогенного впливу. Крім того, автоматизовані системи управління проєктами дають змогу інтегрувати дані різних фахівців (інженерів, екологів, урбаністів), координувати роботу на всіх етапах — від вибору ділянки до експлуатації та рекультивації полігону. Таким чином, використання інформаційних технологій у проектуванні полігонів ТПВ забезпечує більш екологічно безпечне, економічно обґрунтоване та просторово зважене управління твердими побутовими відходами в Україні.

Інформаційні технології також дозволяють змоделювати сценарії розвитку полігону в динаміці — з урахуванням прогнозованих обсягів відходів, кліматичних змін та антропогенного впливу. Крім того, автоматизовані системи управління проєктами дають змогу інтегрувати дані різних фахівців (інженерів,

екологів, урбаністів), координувати роботу на всіх етапах — від вибору ділянки до експлуатації та рекультивації полігону. Таким чином, використання інформаційних технологій у проектуванні полігонів ТПВ забезпечує більш екологічно безпечне, економічно обґрунтоване та просторово зважене управління твердими побутовими відходами в Україні. Проектуванню полігону ТПВ передують складна підготовча робота, однією зі складових якої є визначення найкращого розташування полігону ТПВ. При цьому доводиться враховувати безліч екологічних, економічних та геологічних умов. Як правило, ці умови є взаємно суперечливими, і остаточне рішення щодо вибору ділянки, що відводиться для будівництва полігону ТПВ, є компромісним.

Проектування полігонів ТПВ в Україні здійснюється з урахуванням вимог ДБН В.2.4-2-2005 «Полігони твердих побутових відходів. Основні положення проектування».

На практиці, для вибору придатної ділянки використовують різноманітний картографічний матеріал, який дозволяє обрати варіанти розміщення полігону ТПВ з урахуванням вищезазначених нормативних вимог. У зв'язку з цим, найбільш перспективним варіантом для цієї задачі є використання ГІС-технологій.

Виходячи з практичних досліджень, що здійснювалися на Здолбунівському сміттєзвалищі ТПВ (у Рівненській області) процедурно опишемо послідовність дій, необхідних для вибору потрібної ділянки використовуючи при цьому ГІС-технології.

Попередньо, потрібно проаналізувати вибрану площу на карті, в межах якої необхідно обрати ділянку для будівництва полігону ТПВ. Розміри цієї площі можуть широко варіюватись виходячи з щільності населення, кількості промислових об'єктів, тощо.

3.2.2. Етапи проектування будівництва полігону твердих побутових відходів. Проектування та будівництво полігону ТПВ передбачає реалізацію низки послідовних етапів, кожен з яких є критично важливим для забезпечення екологічної безпеки, технічної ефективності та соціальної прийнятності об'єкта.

1 етап вибору оптимального місця для розміщення полігону ТПВ виконується побудова цифрової моделі ухилів на основі растрового зображення висот. Отримане растрове зображення схилів дозволяє ідентифікувати ділянки з переважно горизонтальним рельєфом. Такі території характеризуються незначними ухилами, що робить їх потенційно придатними для будівництва полігону. Візуально ці ділянки на растрі відображаються світлими відтінками, що спрощує їх ідентифікацію.

2 етап передбачає врахування просторових обмежень, зумовлених санітарно-захисними зонами, наявністю населених пунктів, водних об'єктів, культурної спадщини, транспортної та інженерної інфраструктури. Для цього створюються растрові зображення відстаней – специфічні растри, що описують мінімальні відстані від кожної точки простору до об'єктів-обмежень. У таких растрах більш світлі тони відповідають меншим відстаням, а темніші – більшим, що дозволяє наочно оцінити ступінь допустимості розміщення полігону в тій чи іншій локації.

На 3 етапі виконується перекласифікація растрових зображень ухилів і відстаней. У процесі перекласифікації растрів відстаней вищі значення класів присвоюються територіям, віддаленим від об'єктів-обмежень, оскільки вони мають більшу придатність для облаштування полігону. У випадку з растром ухилів, навпаки – найвищі класи присвоюються відносно рівним ділянкам з мінімальними ухилами. Таким чином, перекласифікація дозволяє перетворити початкові дані у формат, придатний для подальшого ранжування територій за критерієм придатності до розміщення полігону. Рекомендується використовувати не менше десяти класів, щоб забезпечити належну деталізацію аналізу.

4 етап. Для отримання комплексної оцінки придатності ділянок для будівництва полігону ТПВ необхідно здійснити комбінування сформованих просторових даних з урахуванням їхньої «значущості». Вказана «значущість» кількісно характеризує ступінь впливу обмежувальних факторів – аналізованих просторових об'єктів – на вибір ділянки, причому сума всіх важливих елементів має дорівнювати одиниці.

Комбінування даних провадиться за допомогою спеціального інструменту маніпулювання растровими даними «Калькулятора растру», який дозволяє проводити математичні операції з растрами. Фактично вирішується наступне завдання лінійного програмування:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot d_i \rightarrow \max, \quad (3.1)$$

при обмеженнях:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1, \quad -1 \leq \lambda_i \leq 1, \quad i = \overline{1, n} \quad (3.2)$$

де d_i – це відстань з набору просторових даних, отриманих на третьому етапі, λ_i – «значущість» об'єктів. Для того, щоб ділянка, яку ми шукаємо, була віддалена від i -об'єктів, необхідно $\lambda_i > 0$ і якщо наближена до i -об'єктів, то $\lambda_i < 0$.

5 етап. Подальша перекласифікація скомбінованого растру дозволяє виділити найпридатніші ділянки території для будівництва полігону ТПВ.

6 етап. Після завершення процесу перекласифікації растрових даних (ухилів та відстаней), отримані результати трансформуються у векторну форму шляхом перетворення растру на полігональний шар. Це дозволяє просторово окреслити території, які відповідають усім попередньо визначеним критеріям придатності для розміщення полігону ТПВ. Таким чином, полігональний шар є результатом інтеграції тематичних критеріїв і виконує функцію просторового фільтра, що забезпечує об'єктивне обґрунтування вибору потенційно придатних ділянок для подальшого аналізу та оцінки на етапі прийняття управлінських рішень. Оцінка площі цих ділянок дозволяє оцінити можливість їх використання для будівництва полігону ТПВ на визначеній території з урахуванням середньої чисельності населення. Крім того, за наявності кількох ділянок доцільно провести їх ранжування за техніко-економічними критеріями та вибрати найкращий.

У завданнях раціонального управління відходами вибір ділянок для полігонів ТПВ із використанням запропонованої процедури дозволяє суттєво скоротити

витрати часу на проведення проектних робіт, підвищити достовірність їх результатів, а також дослідити вплив кожного з факторів на підсумковий результат.

Ця робота була проведена у контексті Здолбунівського сміттєзвалища ТПВ з використанням програмного продукту ArcGIS компанії ESRI (США).

3.2. Дистанційні методи екологічного моніторингу сміттєзвалищ муніципальних відходів. Методика моніторингу полігонів твердих побутових відходів (ТПВ) передбачає використання космічних знімків з відповідними просторовими та часовими характеристиками, що дозволяють здійснювати тематичне дешифрування об'єктів на досліджуваній території. У дослідженні було взято за основу Здолбунівське сміттєзвалище, розташоване в Рівненській області, як приклад для оцінки просторової динаміки полігону на основі даних дистанційного зондування Землі. На супутникових знімках добре виокремлюється морфологічна структура полігону: ділянки, що вже були рекультивовані, активно використовувані зони складування, фільтратні озера, а також інфраструктура – під'їзні шляхи й тимчасові об'єкти. За спектрометричними характеристиками здійснено аналіз динаміки змін площ полігону впродовж 2003–2020 років, виявлено зони активного використання в різні періоди часу, візуалізовано зміну рослинного покриву на прилеглих територіях та простежено еволюцію транспортного доступу до полігону.

Космічні знімки також використовуються для аналізу геодинамічної безпеки території полігону. Виявлено ознаки екзогенних небезпечних процесів, зокрема зсуви, просідання поверхні, деформації покриття в районах з тривалим терміном експлуатації. Крім того, дистанційне зондування дозволяє виявити стихійні сміттєзвалища та несанкціоновані місця скидання відходів за межами офіційного полігону. Процес дешифрування передбачає два основних етапи: 1) виявлення об'єкта на супутниковому зображенні та 2) розпізнавання його класу. На першому етапі формується вектор ознак для кожного пікселя, який просторово співставляється з географічними координатами. На другому – для кожного

сегментованого об'єкта формується узагальнений вектор характеристик, за яким здійснюється класифікація на основі попередньо визначених еталонних класів.

Ідентифікація полігону ТПВ базується на сукупності прямих дешифрувальних ознак, які безпосередньо спостерігаються на зображенні. Серед них:

- геометричні ознаки (форма, розмір, тінь);
- яскравісні та спектральні характеристики (фототон, рівень яскравості, колір, спектральний відгук);
- структурні ознаки (текстура, внутрішня неоднорідність структури поверхні).

Застосування таких підходів дозволяє проводити високоточний просторовий аналіз полігонів, зокрема оцінювати площу захоронення, інтенсивність змін, техногенне навантаження на довкілля та виявляти критичні екологічні ситуації. (рис. 3.2.).

На основі аналізу космічних знімків, виконаного з часовим інтервалом у десять років, встановлено чітку динаміку просторових змін на території Здолбунівського полігону твердих побутових відходів. За спектральними характеристиками та текстурними ознаками зображень вдалося ідентифікувати окремі ділянки полігону, що вводилися в експлуатацію в різні роки, що дає змогу реконструювати хронологію розвитку сміттєзвалища. Спостерігаються суттєві трансформації прилеглої рослинної покриву, що свідчить про вторинний вплив полігону на довкілля. Також виявлено зміни транспортної інфраструктури – дешифрування супутникових зображень дозволило виділити під'їзні шляхи, які використовувалися в різні часові періоди, що підтверджує динамічний характер логістичного забезпечення функціонування полігону. (рис. 3.2.).

Було досліджено динаміку зміни площі сміттєзвалища на території Здолбунівського району Рівненської області, збільшення площі якого з 2003 по 2019 роки становить 43%.



08/2003

09/2014

08/2024

Рисунок 3.2. Контури черг Здолбунівського полігону ТПВ, що виділені на космічних знімках різних років

У процесі дешифрування було виявлено поступове збільшення площі сміттєзвалища до 2019 року, що видно на рис. 3.3. Аналіз знімків території сміттєзвалища поблизу м. Здолбунова показав збільшення площі з 2003 по 2019 роки на 43%.

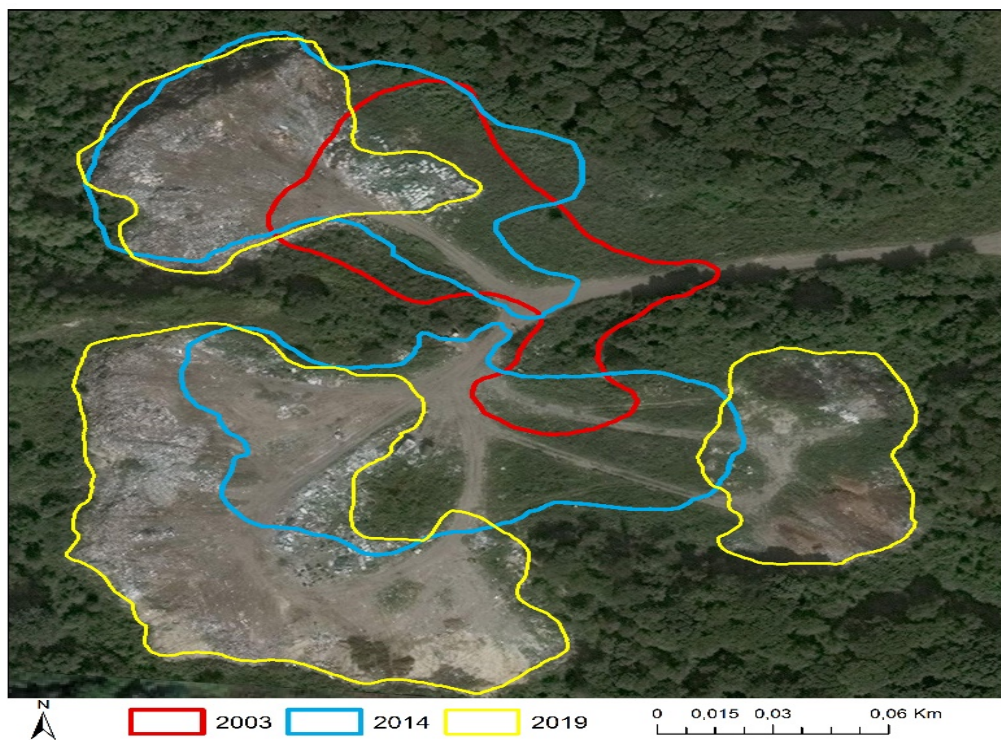


Рисунок 3.3. Картохема змін геометричних параметрів черг Здолбунівського полігону ТПВ

Картосхема змін геометричних параметрів черг Здолбунівського полігону ТПВ, сформована за результатами дешифрування космічних знімків із високою просторовою роздільною здатністю (0,06 км), відображає динаміку розширення меж полігону у 2003, 2014 та 2024 роках. Вектори меж кожної черги нанесено на карту з використанням різних кольорів, що дозволяє простежити темпи експансії полігону та визначити напрямки найбільш інтенсивного зростання його території.

Отримані результати свідчать про істотні зміни просторової конфігурації полігону протягом аналізованого періоду, що є наслідком як збільшення обсягів ТПВ, так і недостатньо обґрунтованого вибору ділянки для його розміщення. Аналіз супутникових даних дозволив виявити випадки нераціонального планування, що призвели до неефективного використання площі, наближення звалищних тіл до водно-болотних угідь та урбанізованих зон, а також ознаки техногенної деградації прилеглих екосистем.

Таким чином, моніторинг полігону із залученням космічної зйомки є надійним інструментом для виявлення тенденцій деградації та обґрунтування рішень щодо перспективної рекультивациі або модернізації об'єкта.

3.4. Геоінформаційна технологія температурного картографування сміттєзвалищ за даними дистанційного зондування. На прикладі Здовбицького полігону твердих побутових відходів та прилеглих до нього територій у Здолбунівському районі Рівненської області продемонстровано ефективність та інформативність використання розробленої методики моніторингу температурного режиму об'єктів розміщення відходів. У дослідженні було застосовано можливості хмарної платформи Google Earth Engine, яка забезпечує доступ до великого архіву супутникових знімків та дозволяє виконувати масштабний аналіз з урахуванням часових змін. Реалізований алгоритм моніторингу побудовано на основі даних теплого інфрачервоного діапазону, отриманих із супутника LANDSAT-8, що дозволило виявити ділянки з підвищеними температурними аномаліями. Такий підхід забезпечує виявлення потенційно пожежонебезпечних зон, як у межах сміттєзвалища, так і на прилеглих

ділянках, дозволяючи своєчасно реагувати на загрози загоряння та розробляти превентивні заходи для запобігання надзвичайним ситуаціям. Як відомо, основними перевагами зазначеної платформи є швидка обробка, що досягається великою потужністю платформи, а також велика кількість наборів даних супутникових зніманих.

Алгоритм розробленої методики моніторингу пожеж передбачає використання набору зображень Landsat-8 рівня обробки Surface Reflectance. Значення температури розраховується з даних термального каналу Thermal Infrared (TIRS) 1, діапазон довжин електромагнітних хвиль якого становить 10.6–11.19 мкм, а просторова розрізненість – 100 м/піксель. Знімки даного набору обиралися за період досліджень (на конкретні календарні дати з 2013 по 2022 рік), після чого проводилося маскування хмар, тіней від хмар та снігу для відсікання хибних значень температур. Для цього використовувалася бітова маска Landsat-8, що зберігається в каналі «QA_PIXEL». Біти, що відповідають пікселям з хмарами, з їхніми тінями та зі сніговим покривом, мають значення 3, 4 та 5 відповідно. Після процедури маскування застосовувався масштабний коефіцієнт з метою отримання валідних значень в кожному пікселі зображення. Для термального каналу ця дія включала в себе множення значення в кожному пікселі на масштабний коефіцієнт 0.00341802 та додавання до нього додаткового зміщення на 149.0.

Моніторинговими точками у межах Здовбицького сміттєзвалища і прилеглих до нього площ обрано 4 різні типи об'єктів земної поверхні: одна з черг звалища, новостворений кар'єр будівельних матеріалів (як ділянки, що зазнали антропогенних змін) та площадки природного лісового масиву і сільськогосподарського угіддя (для здійснення контролю). Отримавши значення температури в кожній точці поверхні дослідження за заданий період (10 років), побудовано відповідні графіки, що демонструють її часові зміни (рис. 3.4.-3.5.). Дані з аномально високими температурами можуть бути інтерпретовані як наявність прихованих пожеж у заданій точці у відповідний час. Насамперед це стосується підповерхневих щодо карти звалища пожеж, що імовірно зумовлені процесами тління, екзотермічними реакціями окислення сміттєзвалища. Адже

відомо, що термічне розкладання пального матеріалу та часткове його згоряння відзначається температурами 500–800°C, а зона остаточного згорання продуктів розкладання пального характеризується максимальними температурами, що сягають 900–1500°C.

Узагальнені результати проведених нами досліджень наведено у вигляді двох графіків. На одному з них (рис. 3.5.) у вигляді стовпчастої гістограми відображено часовий ряд температури поверхні за даними теплового каналу Landsat-8 для двох відмінних між собою типів поверхні, а саме: поверхні власне сміттєзвалища та поверхні найближчого до нього лісового масиву. Загалом отримані результати вказують на те, що значних температурних аномалій на сміттєзвалищі не зафіксовано. Зареєстрований максимум температур становив 38,1 °C у спекотний день 06.08.2017 р. З цього можна зробити висновок, що значних пожеж внаслідок самозаймання сміття на об'єкті протягом 2013- 2022 рр. не відбувалося. Паралельно з цим на графіку видно, що максимальна температура на поверхні сміттєзвалища загалом вище за температуру, яка зафіксована над лісовим покривом, де максимум не перевищує 36,3 °C.

Перший графік представлено у вигляді точкової діаграми (рис. 3.4.). Він є не менш наочний та інформативний, ніж другий, і показує ті ж самі дані, але у вигляді хмари точок. Проте на ньому додатково представлено моніторингові дані зміни поверхневої температури у межах одного зі сільськогосподарських угідь та кар'єру будівельних матеріалів, що розташовані поряд із дослідженою картою Здолбунівського сміттєзвалища ТПВ. З аналізу цього графіка випливає, що на сільськогосподарському угідді температурні піки переважно є вищими ніж на сміттєзвалищі, але не істотно. Вони сягають максимуму 42 °C (станом на 06.08.2017 р.). Таким чином, отримані дані засвідчують, що в межах як Здолбунівського сміттєзвалища ТПВ, так і прилеглих до нього сільськогосподарських угідь протягом дослідженого періоду в 10 років загорянь не відбувалося. Принаймні це стосується конкретних чотирьох точок моніторингових спостережень на розглянутій території.

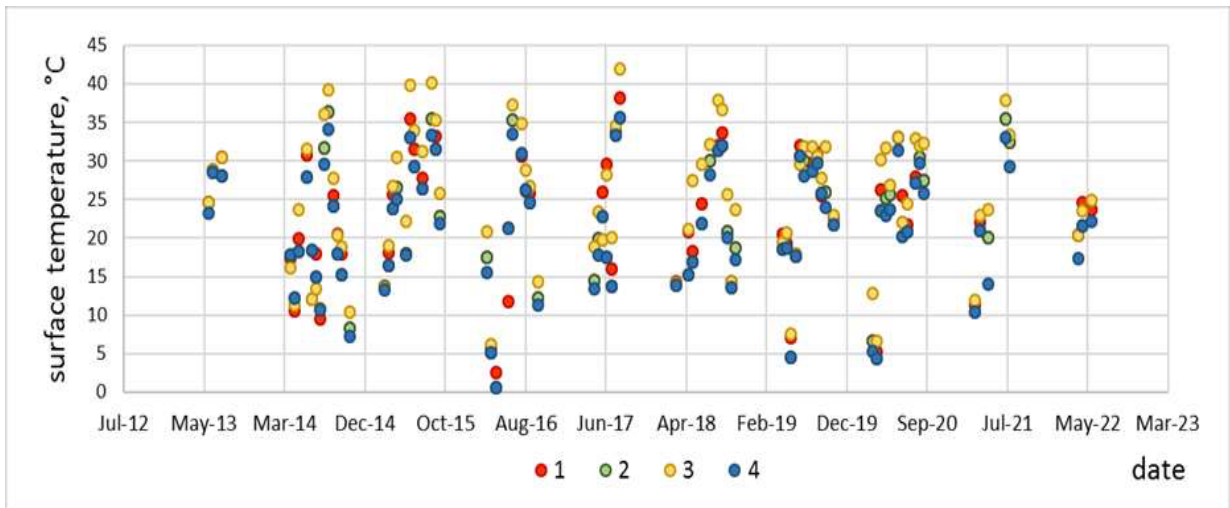


Рисунок 3.4. Графік зміни температури поверхні компонентів довкілля в межах Здолбунівського сміттєзвалища ТПВ та прилеглих до нього площ протягом 2013-2022 рр. (на шкалі дат вказані: місяць-рік). 1 – Здолбунівське сміттєзвалище, 2 – лісовий масив, 3 – сільськогосподарське угіддя, 4 – кар’єр будівельних матеріалів

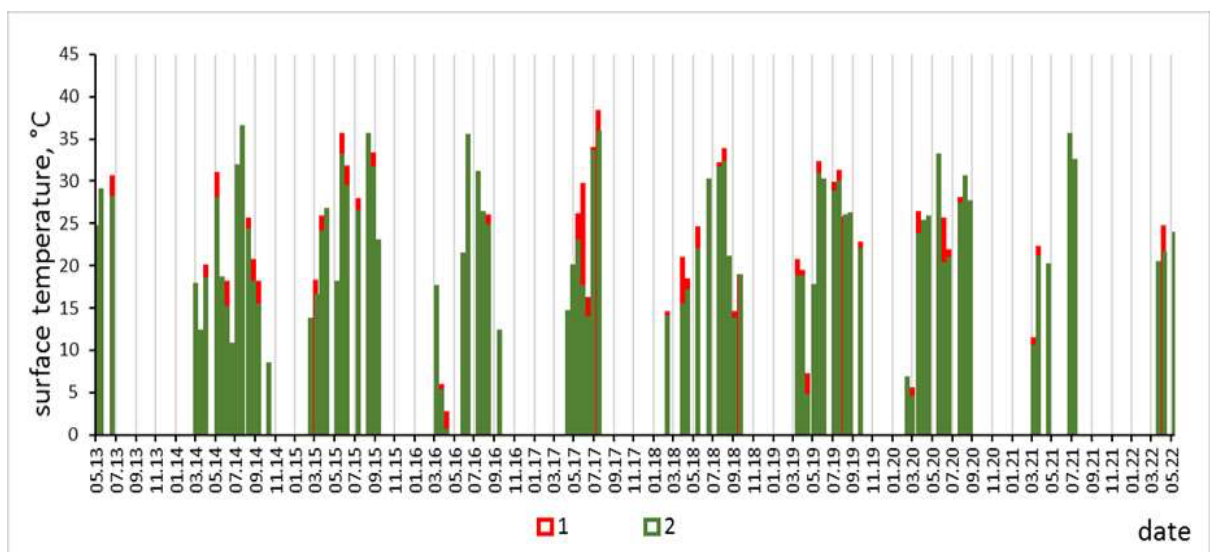


Рисунок 3.5. Графік порівняння ходу температури Здолбунівського сміттєзвалища та сусіднього лісового масиву за 2013-2022 рр. 1 – Здолбунівське сміттєзвалище, 2 – лісовий масив

Отже, застосування розробленого алгоритму методики моніторингу пожеж на підставі використання набору зображень теплового каналу, отриманих з космічного апарата Landsat-8, показало його інформативність й результативність у дослідженні зміни температури відмінних земних покривів. Реалізація

відповідної методики на прикладі території Здолбунівського сміттєзвалища та прилеглих до нього ділянок з природнім і антропогенно зміненим ландшафтом (лісовий масив, сільськогосподарське угіддя, кар'єр будівельних матеріалів) дозволила встановити, що протягом 2013–2022 рр. станом на певні календарні дати істотних температурних аномалій на жодному з указаних об'єктів не зареєстровано. На одній з карт звалища максимальна поверхнева температура (38,1 °C) виявлена 06.08.2017 р., що характеризувався спекотною погодою. Отже, істотних пожеж внаслідок самозаймання сміття на об'єкті, які б відбувалися тривалий час (декілька днів, враховуючи періодичність знімання території з супутника Landsat-8) за даними дистанційних досліджень не зафіксовано.

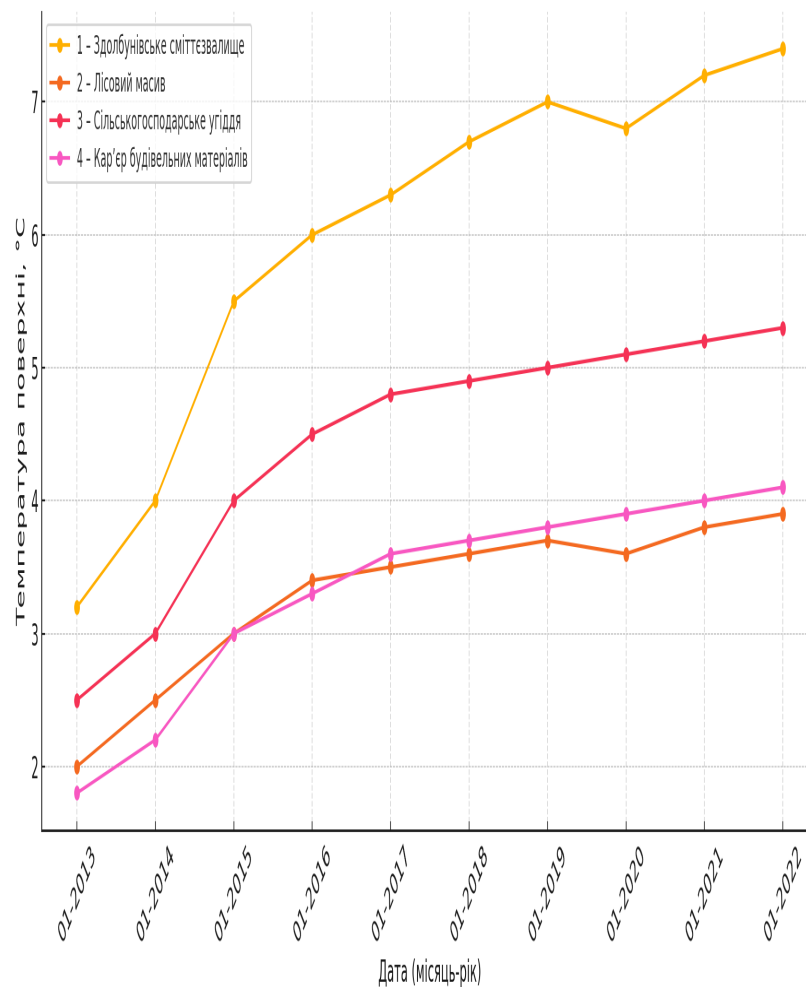


Рисунок 3.6. Графік зміни температури поверхні різних компонентів довкілля в межах Здолбунівського сміттєзвалища та прилеглих територій у 2013–2022 роках

На графіку 3.6. представлено зміну температури поверхні різних компонентів довкілля в межах Здолбунівського сміттєзвалища та прилеглих територій у 2013–2022 роках. Чітко спостерігається стійка тенденція підвищення температури на території сміттєзвалища, що, ймовірно, пов'язано з активними біохімічними процесами розкладу відходів. Найнижчі температурні значення зафіксовані в межах лісового масиву, а сільськогосподарські угіддя та кар'єр будівельних матеріалів демонструють помірне зростання температури. Така візуалізація дозволяє не лише виявити локальні аномалії, а й обґрунтувати потребу в подальшому температурному моніторингу, зокрема в контексті оцінки ризику виникнення пожеж.

Отримані результати можуть засвідчити дотримання технології складування, накопичення й зберігання відходів на території Здолбунівського сміттєзвалища комунальними та іншими службами, що задіяні в його експлуатації. Відповідальне ставлення до поводження з відходами в межах сміттєзвалища протягом 10-літнього періоду 2013–2022 рр. дозволило запобігти й уникнути екологічно небезпечних надзвичайних ситуацій, пов'язаних зі значними пожежами внаслідок самозаймання сміття.

3.5. Передумови впровадження геоінформаційних технологій для екологічного моніторингу полігонів ТПВ: досвід України та міжнародна практика

Ефективне управління полігонами твердих побутових відходів у сучасних умовах нерозривно пов'язане із широким використанням геоінформаційних технологій. В Україні інтенсивний розвиток ГІС і ДЗЗ-технологій у цій сфері розпочався порівняно недавно, однак поступово наближається до міжнародних стандартів, які вже діють у країнах ЄС та США. На відміну від України, де екологічний моніторинг полігонів лише інтегрується в систему управління довкіллям, у Європейському Союзі та США він базується на законодавчо закріплених вимогах обов'язкового дистанційного моніторингу за допомогою супутникових технологій, автоматизованих сенсорних систем та цифрових

екосистем управління даними. Інформаційні технології дозволяють системно відстежувати динаміку забруднення ґрунтів, водних ресурсів та атмосфери, забезпечуючи інтеграцію просторових даних із результатами натурних гідрогеологічних і хімічних досліджень. У межах цього підходу ГІС-середовище використовується для виявлення критичних зон, прогнозування шляхів поширення забруднюючих речовин і оцінки ризиків для населення та природи. У США, наприклад, такі платформи, як EPA EnviroAtlas або система EPA Superfund, об'єднують дані супутникового моніторингу та локальні сенсорні дані для оцінки екологічної безпеки полігонів. В Україні схожі можливості реалізуються через локальні системи моніторингу, прикладом яких є дослідження Здолбунівського полігону побутових відходів. Відповідно до міжнародної практики, ДЗЗ активно застосовується для аналізу температурних аномалій, визначення ділянок самозаймання на полігонах, контролю змін ландшафтної структури та деградації біорізноманіття. Українські дослідження на базі даних Landsat-8 із використанням веб-платформи Google Earth Engine демонструють високу інформативність подібних технологій для локального моніторингу. Встановлено, що в межах Здолбунівського полігону у 2013–2022 рр. істотних температурних аномалій, які свідчили б про серйозні підземні пожежі, зафіксовано не було, що вказує на правильну організацію експлуатації об'єкта.

Особливе значення має застосування автоматизованих сенсорних систем, здатних у реальному часі відстежувати концентрації забруднюючих речовин у повітрі та воді. У країнах ЄС такі системи інтегровані з національними еко-дашбордами, що відображають актуальні екологічні дані у відкритому доступі. Україна лише починає створювати подібні цифрові платформи, однак перші результати показують високу ефективність такого підходу у сфері попередження екологічних ризиків на полігонах.

Ілюстративно систематизовані особливості застосування інформаційних технологій наведено у створених інфографіках. На першій схемі (рис. 3.7.) представлено базову модель інтеграції ГІС та ДЗЗ у процес моніторингу стану

полігонів ТПВ, починаючи від збору даних і завершуючи прийняттям рішень щодо запобігання надзвичайним ситуаціям.



Рисунок 3.7. Роль інформаційних технологій у моніторингу полігону

На другій схемі (табл. 3.1.) показано етапи реалізації дистанційного моніторингу за допомогою супутникових технологій та веб-аналітики, включаючи підбір космічних знімків, обробку даних, тематичне дешифрування та побудову картографічних моделей змін екологічного стану полігону.

Таблиця 3.1. Етапи супутникового моніторингу полігонів ТПВ

Критерій	Україна	ЄС/США
Інтеграція ГІС-технологій	Локальні проекти, початок масового впровадження	Обов'язкова вимога для моніторингу полігонів
Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ)	Пілотні проекти на базі Landsat, Sentinel	Регулярний супутниковий моніторинг у рамках національних програм

Критерій	Україна	ЄС/США
Автоматизовані сенсорні системи	Епізодичне використання у проектах	Масове впровадження мереж стаціонарних і мобільних сенсорів
Екологічні дашборди	Формування окремих баз даних	Інтегровані платформи з відкритим доступом для населення
Моделювання поширення забруднень	Наукові дослідження на локальному рівні	Стандартизовані моделі національного рівня
Прогнозування екологічних ризиків	Часткове застосування математичних моделей	Обов'язкове використання моделей прогнозування ризиків і надзвичайних ситуацій
Нормативно-правова база	В стадії удосконалення	Високий рівень законодавчої регламентації
Освітні та дослідницькі програми	Зростання кількості проєктів	Стабільно діючі державні програми підтримки екологічних технологій

Таким чином, порівняльний аналіз українського і міжнародного досвіду показує, що інтеграція геоінформаційних технологій у моніторинг полігонів відходів є обов'язковим компонентом сучасної екологічної політики. В Україні накопичено достатній досвід локальних ініціатив, які можуть бути масштабовані до загальнодержавного рівня за умов адаптації передових практик ЄС і США. Подальший розвиток цифрового екологічного моніторингу сприятиме мінімізації техногенного навантаження, підвищенню екологічної безпеки територій та сталому управлінню відходами. Запровадження інформаційних технологій у процеси моніторингу та управління полігонами твердих побутових відходів є критично важливою умовою для досягнення високого рівня екологічної безпеки.

Досвід Здолбунівського полігону демонструє, що сучасні ІТ-рішення — від ГІС-аналізу до супутникового моніторингу — забезпечують наукове обґрунтування природоохоронних заходів та дозволяють своєчасно реагувати на екологічні виклики. Системна інтеграція українських ініціатив із найкращими міжнародними практиками сприятиме формуванню ефективної моделі сталого управління відходами в Україні та зміцненню національної екологічної політики.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.

1. Інформаційні технології (ГІС, ДЗЗ, автоматизовані системи) довели свою критичну роль у забезпеченні комплексного моніторингу екологічного стану Здолбунівського полігону ТПВ, дозволяючи здійснювати оперативний збір, обробку та інтеграцію даних про стан ґрунтів, водних ресурсів та атмосфери.

2. Геоінформаційне моделювання впливу полігону на довкілля показало високу ефективність у визначенні зон ризику, оцінці просторової динаміки забруднень та плануванні заходів з реабілітації деградованих територій.

3. Використання методів дистанційного зондування дозволило простежити зміни в структурі полігону, зафіксувати збільшення його площі на 43 % за останні 16 років, а також здійснити температурне моніторування для виявлення пожежонебезпечних ділянок.

4. Автоматизовані екологічні платформи та інтегровані ГІС-бази даних є основою для формування ефективних стратегій управління полігоном, що включають збір і очищення фільтрату, дегазацію, гідроізоляцію та фіторемедіацію.

5. Моделювання екологічних процесів у ГІС-середовищі дало можливість виявити деградацію ландшафтів, скорочення біорізноманіття та фрагментацію природних екосистем під впливом функціонування полігону, що вимагає подальших заходів екологічної компенсації.

6. Розробка інтегрованої цифрової екосистеми управління відходами на базі інформаційних технологій є стратегічно важливим напрямом для мінімізації екологічних ризиків та підтримки сталого розвитку територій, що зазнають техногенного навантаження.

РОЗДІЛ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-АНАЛІТИЧНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПОЛІГОНУ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

Розділ присвячено деталізованій структурі ІАСМ для Здолбунівського полігону. Визначено ключові модулі системи: збір даних, обробка та аналіз інформації, геоінформаційна інтеграція, підтримка прийняття рішень, інформаційна взаємодія та захист даних. Описано логіку функціонування системи, яка передбачає автоматизацію всіх етапів моніторингу та управління екологічними ризиками. Показано, що впровадження ІАСМ дозволяє забезпечити науково обґрунтоване управління екологічною безпекою в режимі реального часу та значно підвищити ефективність екологічного супроводу полігону. Обґрунтовано необхідність створення інтегрованої інформаційно-аналітичної системи моніторингу для забезпечення безперервного контролю екологічного стану території полігону. Визначено основні стратегічні завдання моніторингу, окреслено об'єкти спостереження та запропоновано застосування геоінформаційних технологій для інтеграції даних різних типів.

4.1. Інформаційно-аналітична система моніторингу території Здолбунівського полігону побутових відходів

4.1.1. Основні стратегічні завдання контролю й моніторингу. Модернізація території Здолбунівського полігону побутових відходів залишає за собою низку екологічних проблем. У разі відсутності належного фінансування рекультиваційних робіт актуальним залишається вивчення процесів самовідновлення елементів довкілля, включаючи гідрогеологічний режим, активізацію зсувонебезпечних процесів, контроль якості вод та ґрунтів. Принципи моніторингу сміттєзвалищ на стадії ліквідації наразі недостатньо розроблені в теоретичному, методичному та матеріально-технічному плані.

Необхідність наукового обґрунтування моніторингу в районі полігону зумовлена складною мозаїкою техногенезу, що потребує використання широкого спектра теоретичних і методичних засобів. Наявність джерел небезпеки

передбачає моніторинг не лише довкілля, а й самих джерел. Прийняття управлінських рішень щодо ґрунтів, водних ресурсів чи відходів вимагає наявності інтегрованої інформації. Саме тому слід створити єдину автоматизовану інформаційну систему з інтеграцією відомчих баз моніторингу та кадастрів на основі геоінформаційних технологій.

Стратегія керованого контролю та моніторингу повинна охоплювати дослідження геодинамічних процесів, оцінювання стану поверхневих і підземних вод, геохімічних параметрів. Тактичні завдання деталізують стратегічні оцінки до рівня конкретних взаємодій та масштабів інформаційних одиниць. Основою для розробки тактики є дані геологічних, гідрогеологічних та інженерно-геологічних досліджень.

Запропоновано створення інформаційно-аналітичної системи моніторингу (ІАСМ), що дозволить не лише обробляти дані, але й прогнозувати екологічні наслідки на основі поточного стану території. ІАСМ повинна включати підсистеми моніторингу ґрунтів, промислових відходів, екзогенних геологічних процесів, поверхневих та підземних вод.

Моніторинг ґрунтів із застосуванням ДЗЗ, наземних спостережень та фондових даних дозволить виявляти зміни в складі ґрунтів і спрогнозувати міграцію важких металів. Підсистема промислових відходів повинна містити інформацію про джерела утворення, склад, обсяг і небезпеку відходів. Результатом стане створення карт зон техногенного впливу.

Моніторинг екзогенних геологічних процесів базується на аерокосмічних зйомках і дозволяє ідентифікувати зони осідання, зсувів і заболочення. Система моніторингу водних об'єктів повинна включати пробовідбір, аналіз поточних заходів, виявлення джерел забруднення та розробку заходів з покращення стану водних ресурсів. Усі ці компоненти інтегруються в єдину ІАСМ, що дозволяє вчасно виявляти ризики і мінімізувати екологічні наслідки.. Моніторинг підземних вод у межах комплексу Здолбунівського полігону побутових відходів є ключовою складовою системи екологічного контролю, що має критичне значення для підвищення рівня екологічної безпеки довкілля. У зв'язку з цим існує нагальна

потреба у впровадженні комплексу заходів, спрямованих на оцінку сучасного стану мережі спостережних свердловин, відновлення моніторингу на наявних свердловинах, удосконалення нормативно-методичної бази моніторингових процедур, а також на координацію діяльності суб'єктів моніторингу для підвищення ефективності збору та використання екологічної інформації про стан підземних вод.

Інформаційно-аналітична система моніторингу водного середовища (ІАСМ), впроваджена для Здолбунівського полігону, забезпечує формування державних інформаційних ресурсів обліку водних об'єктів, своєчасне виявлення негативних змін їхнього стану та спрощує доступ до екологічної інформації для потреб аналізу, прогнозування та обґрунтування управлінських рішень у сфері охорони довкілля. Об'єктами системи моніторингу на території Здолбунівського полігону побутових відходів є техногенні відходи (тіло полігону), ґрунтовий покрив навколо об'єкта, поверхневі й підземні води, а також процеси екзогенних геологічних змін, зокрема зсувні процеси та підтоплення (рис.4.2.). Для реалізації завдань моніторингу необхідно впроваджувати системи збору даних про стан елементів довкілля, забезпечувати обробку, аналіз і систематизацію результатів спостережень та формувати єдину інтегровану базу даних. На кожному етапі здійснення моніторингу необхідна адаптація застосовуваних методик до особливостей досліджуваних процесів і властивостей середовища, що зумовлює необхідність попередньої оцінки технічних та аналітичних можливостей наявного обладнання й технологій. Особливого значення набуває розроблення та проектування моніторингової системи, яка забезпечить найвищу достовірність оцінок за оптимальних фінансових витрат. У межах моніторингових заходів доцільним є використання сучасних сенсорних технологій, таких як флуоресцентні біосенсори на основі ферментів, що дозволяють здійснювати швидкі та високоточно вимірювання параметрів водного середовища, включаючи виявлення токсичних речовин.

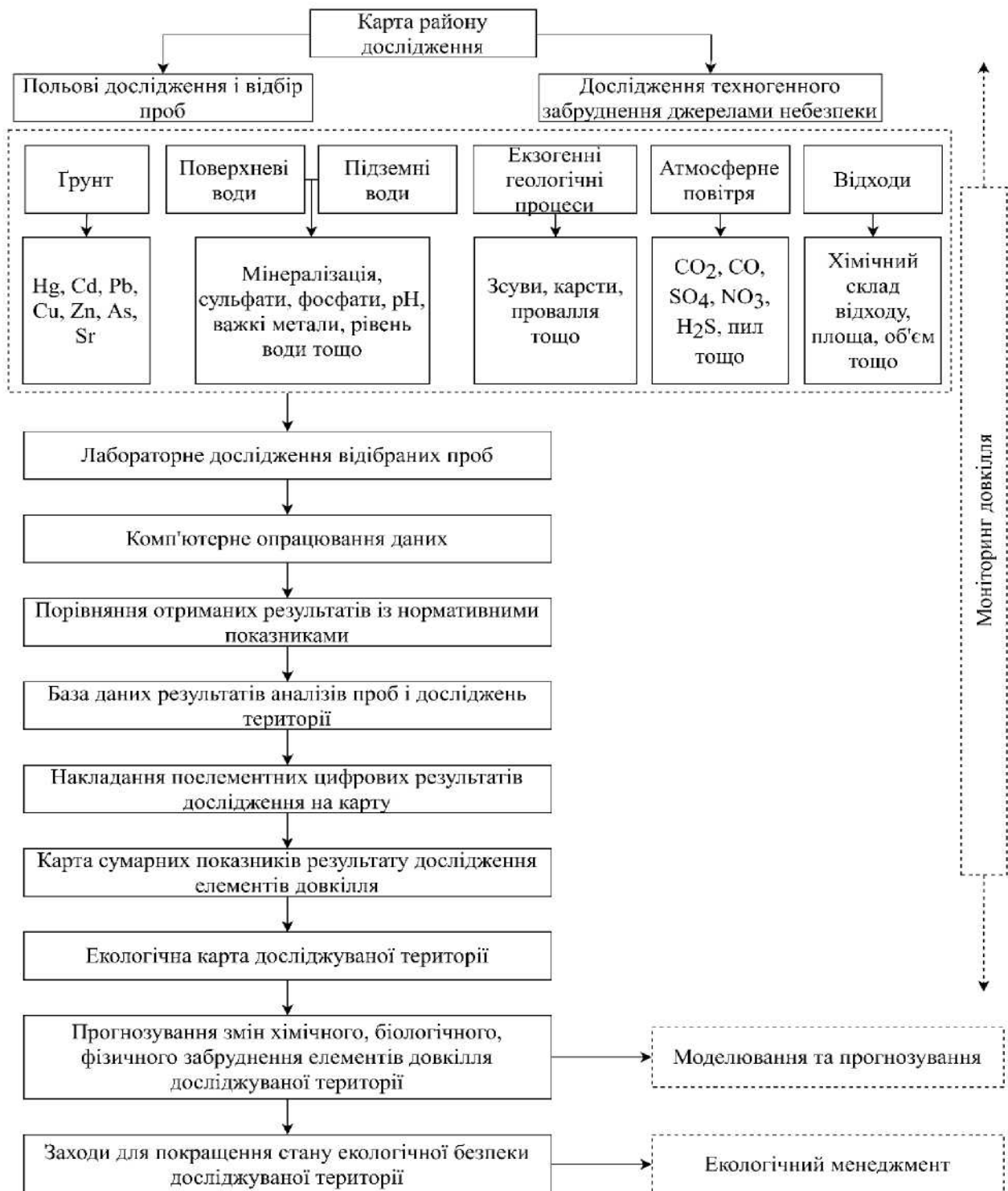


Рисунок 4.1. Інформаційна система моніторингу, моделювання та прогнозування екологічної безпеки полігону побутових відходів

Для прогнозування змін екологічної безпеки на території Здолбунівського полігону побутових відходів інформаційно-аналітична система повинна включати

дослідження всіх потенційних джерел екологічної небезпеки, пов'язаних із функціонуванням та впливом полігону на довкілля.

4.1.2. Архітектура та проєктування геоінформаційної системи.

Архітектура ІАСМ повинна базуватися на поєднанні банку даних, геоінформаційної карти та спеціалізованого програмного забезпечення. Програмний комплекс має забезпечувати інтеграцію бази даних із електронною картою, здійснювати пошук об'єктів моніторингу, візуалізацію даних про якість компонентів довкілля, локалізацію джерел небезпеки, автоматизовану побудову тематичних карт, нанесення точок відбору проб, місць водозаборів та скидів. Картографічною основою для розробки заходів з екологічного управління мають слугувати тематичні карти, зокрема карти ураженості території екзогенними процесами, карти оцінки техногенного навантаження, карти просторового розподілу забруднюючих речовин у ґрунтах та водах. Ефективним інструментом для реалізації зазначених завдань є використання геоінформаційної системи QGIS, яка є багатофункціональним програмним середовищем з відкритим кодом. QGIS дозволяє здійснювати обробку просторових даних, створення картографічної продукції, інтеграцію із зовнішніми базами даних, застосування сучасних методів геообробки та просторового аналізу, а також розширення функціоналу за допомогою плагінів на мовах Python та C++. Функціонування ІАСМ для моніторингу екологічного стану Здолбунівського полігону має базуватися на системному зборі та веденні нормативної і оперативної інформації, оперативному та ретроспективному аналізі екологічних даних, підтримці процесів прийняття рішень через системно-аналітичні інструменти, організації електронного документообігу, забезпеченні внутрішньої діяльності інформаційно-аналітичних центрів, захисті даних та наданні технологічної підтримки функціонування інформаційної інфраструктури. Під час експлуатації інформаційно-аналітичної системи моніторингу (ІАСМ) її діяльність повинна реалізовуватися за такими ключовими напрямками:

1. Збір та супровід інформаційних ресурсів — систематичне накопичення, оновлення та ведення оперативної і нормативно-довідкової інформації, включаючи бази класифікаторів, картографічні матеріали, гідрогеологічні і геоекологічні дані.

2. Оперативний аналіз даних — інтерактивна обробка поточної інформації для виявлення змін екологічного стану, генерації тривожних сигналів і прийняття рішень у режимі реального часу.

3. Ретроспективний аналіз — вивчення динаміки змін на основі архівних даних, з метою встановлення причинно-наслідкових зв'язків і прогнозування довгострокових наслідків техногенного впливу.

4. Системно-аналітична підтримка управлінських рішень — формування аналітичних висновків, побудова сценаріїв та моделей ризиків для оптимізації процесів прийняття екологічно обґрунтованих рішень.

5. Підтримка документообігу — автоматизоване ведення звітної, технічної та адміністративної документації, включаючи формування протоколів, висновків, приписів та експертних актів.

6. Забезпечення внутрішньої організаційної діяльності — координація взаємодії підрозділів, планування заходів моніторингу, логістика польових досліджень та взаємодія з зовнішніми структурами.

7. Інформаційна безпека — захист баз даних, протоколів обміну інформацією та каналів комунікації від несанкціонованого доступу, втрати або викривлення інформації, відповідно до стандартів кібербезпеки.

8. Технологічна підтримка — забезпечення безперебійного функціонування апаратно-програмного комплексу центрів моніторингу, оновлення програмного забезпечення, підтримка серверів, баз даних і хмарних сервісів.

Усі процеси збору, зберігання, обробки, моделювання та візуалізації даних в ІАСМ реалізуються із використанням сучасних інформаційних онлайн-технологій, що гарантують високу точність, достовірність та швидкість одержаних результатів. Алгоритми розрахунків і методики аналізу інтегровані

безпосередньо у програмне забезпечення, що дозволяє автоматизувати рутинні процедури та знизити ризик людських помилок.

Створення інтегрованої інформаційно-аналітичної системи моніторингу (ІАСМ) Здолбунівського полігону побутових відходів є важливим кроком для забезпечення комплексного та системного підходу до оцінки екологічного стану території, управління даними і прийняття ефективних природоохоронних рішень. Впровадження ІАСМ дозволить істотно підвищити рівень вивченості екологічної ситуації як безпосередньо на полігоні, так і на прилеглих до нього територіях. За допомогою сучасних методів збору, аналізу та обробки просторової й атрибутивної інформації, буде створено науково обґрунтовану базу знань про стан довкілля, що, у свою чергу, сприятиме виявленню критичних змін у компонентах навколишнього середовища на ранніх стадіях. Одним із ключових результатів впровадження ІАСМ стане забезпечення оперативного доступу до актуальної та достовірної екологічної інформації для широкого кола користувачів — від місцевих органів влади та екологічних служб до науково-дослідних установ і громадських організацій. Це значно підвищить якість інформаційного забезпечення процесу прийняття управлінських рішень, а також сприятиме прозорості у сфері екологічного моніторингу. ІАСМ забезпечить також надійне обґрунтування природоохоронних заходів, завдяки комплексній обробці екологічних даних та побудові прогностичних моделей змін стану довкілля. Зокрема, прогнозування просторово-часових змін у розповсюдженні забруднення, стані підземних та поверхневих вод, стабільності геологічного середовища дозволить своєчасно планувати та коригувати заходи із запобігання погіршенню екологічної ситуації. Важливим наслідком впровадження ІАСМ стане зниження рівня екологічної небезпеки як самого Здолбунівського полігону побутових відходів, так і прилеглих до нього територій. Завдяки побудові просторових моделей ризику і оцінці зон впливу потенційних джерел забруднення можна буде ефективніше реалізовувати заходи з локалізації небезпечних процесів, запобігання розповсюдженню забруднювальних речовин, стабілізації техногенно навантажених екосистем. Крім того, створення ІАСМ дозволить інтегрувати

новітні підходи до екологічного моніторингу — застосування безпілотних літальних апаратів для зйомки території, впровадження мережі автоматизованих сенсорних систем для реєстрації змін у підземних водах та атмосферному повітрі, використання методів машинного навчання для аналізу великих обсягів екологічних даних та виявлення прихованих закономірностей у їх динаміці. Таким чином, реалізація ІАСМ Здолбунівського полігону побутових відходів відкриває можливість для переходу до якісно нового рівня управління екологічною безпекою об'єкта, базованого на принципах науковості, системності, технологічності та сталого розвитку.

4.1.3. Етапи просторового аналізу та візуалізації даних. Реалізація інтегрованої інформаційно-аналітичної системи моніторингу (ІАСМ) для Здолбунівського полігону побутових відходів передбачає кілька послідовних етапів, кожен із яких має ключове значення для створення ефективної та стійкої системи екологічного моніторингу.

На першому етапі здійснюється розроблення концептуальної моделі ІАСМ, яка визначає основні цілі, завдання, об'єкти моніторингу, джерела екологічних загроз, а також формує перелік основних показників стану довкілля, що підлягатимуть регулярному спостереженню та оцінці. Особлива увага приділяється визначенню потенційно небезпечних зон навколо полігону та картуванню ризиків для підземних і поверхневих вод, ґрунтів, атмосфери.

Другий етап включає створення системи збору даних, яка передбачає організацію мережі спостережних свердловин, встановлення автоматизованих сенсорних станцій для моніторингу основних фізико-хімічних параметрів середовища, використання дистанційного зондування Землі та геоінформаційних технологій для постійного оновлення просторової інформації. Для підвищення якості даних передбачено також впровадження сучасних методів калібрування та верифікації результатів.

Третій етап спрямований на формування інформаційно-аналітичної бази, що включає розробку структури банку даних, створення тематичних карт,

електронних каталогів об'єктів моніторингу, а також інтеграцію ГІС-рішень для забезпечення просторового аналізу та візуалізації даних. Важливою складовою цього етапу є створення програмного забезпечення, що об'єднує базу даних і ГІС-платформу, забезпечує автоматизований збір, обробку, аналіз та представлення результатів моніторингу.

На четвертому етапі здійснюється розробка методологічних основ аналізу екологічного стану території полігону на основі системного та багаторівневого підходу. Передбачено застосування сучасних методів математичного моделювання для прогнозування змін довкілля під впливом полігонних процесів, розрахунків індексів екологічної небезпеки, моделювання сценаріїв розвитку ситуації за різних умов функціонування полігону.

Завершальним етапом є впровадження механізмів управління на основі даних моніторингу, що включає регулярне інформування зацікавлених сторін про екологічний стан території, розроблення рекомендацій щодо природоохоронних заходів, оперативне реагування на виявлені загрози та постійне вдосконалення функціонування ІАСМ відповідно до змін зовнішнього середовища та розвитку технологій. Таким чином, впровадження ІАСМ на Здолбунівському полігоні побутових відходів забезпечить науково обґрунтовану підтримку екологічної безпеки об'єкта, сприятиме запровадженню принципів сталого управління відходами та збереженню природного середовища для майбутніх поколінь.

Розгортання інтегрованої інформаційно-аналітичної системи моніторингу для Здолбунівського полігону побутових відходів матиме також важливе значення для досягнення цілей національної екологічної політики України, зокрема у контексті імплементації положень Угоди про асоціацію з Європейським Союзом щодо управління відходами, охорони водних ресурсів та зменшення негативного впливу на довкілля. Створена система дозволить забезпечити комплексну оцінку ризиків, пов'язаних із забрудненням підземних та поверхневих вод, деградацією ґрунтів, поширенням шкідливих речовин через атмосферне повітря та розвитком екзогенних геологічних процесів (просідання, зсуви, руйнування дамб тощо). Такий підхід відповідатиме сучасним міжнародним практикам екологічного

моніторингу об'єктів захоронення відходів та дозволить своєчасно виявляти критичні зміни в екосистемі.

У межах розвитку ІАСМ особливу увагу слід приділяти застосуванню безпілотних літальних апаратів для дистанційного зондування території полігону, використанню автоматизованих гідрологічних станцій для моніторингу підземних вод, впровадженню новітніх біосенсорних технологій для експрес-аналізу якості водних та ґрунтових ресурсів. Додатково має бути передбачено інтеграцію даних з регіональними та національними екологічними базами для забезпечення повної сумісності інформації та можливості її подальшого використання в загальнодержавних екологічних проєктах.

Окрім того, ІАСМ Здолбунівського полігону може стати платформою для екологічної освіти та просвітницької роботи серед місцевого населення. Забезпечення відкритого доступу до певної частини даних моніторингу через публічні інформаційні портали сприятиме підвищенню рівня екологічної обізнаності громадськості, активізації громадського контролю та участі у прийнятті екологічно значущих рішень. Важливо наголосити, що з огляду на особливості сучасного розвитку технологій, система має бути спроєктована за принципами масштабованості та адаптивності. Це дозволить у майбутньому безперешкодно інтегрувати нові технічні засоби спостереження, оновлювати програмне забезпечення та розширювати функціональні можливості ІАСМ відповідно до зростаючих вимог щодо екологічного моніторингу та управління ризиками.

Підсумовуючи, запровадження ІАСМ на Здолбунівському полігоні побутових відходів стане не лише важливим кроком до підвищення екологічної безпеки регіону, але й сприятиме розвитку екологічної інфраструктури України в цілому, забезпечуючи наукове, технічне та організаційне підґрунтя для сталого управління відходами.

Отже, інтеграція ІАСМ на базі Здолбунівського полігону побутових відходів може слугувати прикладом успішного поєднання сучасних інформаційних технологій із практичними заходами екологічного моніторингу і безпечного

управління відходами. З огляду на сучасні виклики, такі як зростання обсягів накопичення побутових відходів, ризику потрапляння фільтрату у водоносні горизонти, підвищення рівня забруднення атмосферного повітря парниковими та токсичними газами (метаном, сірководнем, леткими органічними сполуками), система повинна забезпечувати не тільки збір даних, але й глибокий аналітичний супровід усіх екологічних процесів, що відбуваються на полігоні та прилеглих територіях.

Особливо актуальним стає прогнозування довгострокових змін стану навколишнього середовища у межах впливу полігону. За допомогою ІАСМ можна реалізувати сценарний аналіз можливого поширення забруднення в разі виходу з ладу інженерних систем полігону (ущільнення дамб, пошкодження захисних екранів, розгерметизація трубопроводів дренажної системи тощо). На основі математичного моделювання розповсюдження забруднювачів в підземних водах і атмосфері можна своєчасно вживати заходів для запобігання або мінімізації шкоди. Одним із перспективних напрямів розвитку ІАСМ Здолбунівського полігону є впровадження штучного інтелекту для аналізу великих обсягів моніторингових даних, виявлення прихованих трендів і прогнозування екологічних ризиків. Такі підходи дозволяють підвищити оперативність прийняття управлінських рішень, оптимізувати витрати на природоохоронні заходи і підвищити стійкість території до можливих техногенних та природних загроз. Для підтримки актуальності баз даних ІАСМ має бути організована регулярна верифікація даних через польові обстеження, лабораторні аналізи проб води, ґрунтів та повітря, а також шляхом автоматичного збору даних з встановлених датчиків та сенсорів. Особливе місце у цьому процесі мають займати індикаторні свердловини для контролю якості підземних вод та установки для моніторингу емісії газів з поверхні полігону. З метою забезпечення високої ефективності функціонування системи доцільним є також створення локального інформаційно-аналітичного центру на базі органу місцевого самоврядування або відповідального оператора полігону, який би здійснював обробку даних, підготовку звітності та комунікацію з громадськістю. Таким

чином, впровадження ІАСМ на Здолбунівському полігоні побутових відходів сприятиме не лише локальному вирішенню екологічних проблем, а й посилить науково-методичне підґрунтя для подальшого масштабування подібних рішень на інші аналогічні об'єкти України.

4.2. Інформаційно-аналітичні платформи логістичного процесу сортування відходів.

4.2.1. Потенційні ризики інформаційно-аналітичної системи. У випадку аварійної ситуації, наприклад, прориву дамби або витoku фільтрату, ІАСМ повинна забезпечити оперативне виявлення проблеми та швидку реакцію відповідальних служб. Завдяки наявним датчикам рівня рідини у фільтраційних накопичувачах, а також сенсорам вологості ґрунту, система зможе зафіксувати різку зміну показників у реальному часі. Це дозволить:

- негайно сповістити чергові служби екологічного контролю;
- автоматично згенерувати тривожні сигнали для відповідальних операторів полігону;
- розрахувати зону потенційного поширення забруднення за допомогою вбудованих моделей руху підземних вод та стоку;
- розгорнути систему екстреного моніторингу, активуючи мобільні лабораторії або безпілотні апарати для збору актуальної інформації;
- провести аналіз джерела аварії та допомогти швидко локалізувати забруднення.

Такий підхід не лише мінімізує екологічні збитки, а й дозволяє зберегти здоров'я населення та уникнути довготривалих негативних наслідків для довкілля. Для ефективної роботи ІАСМ важливо ще на етапі проєктування врахувати потенційні ризики, серед яких:

1. Ризик втрати даних через фізичні пошкодження серверного обладнання, кібератаки або технічні збої. Для мінімізації цього ризику слід передбачити резервне копіювання даних на хмарні сервіси та локальні резервні носії.

2. Ризик несумісності даних, що може виникати через використання різнорідних джерел інформації або застарілих форматів даних. Для цього потрібно впровадити єдині стандарти збору, обробки та обміну даними.

3. Ризик невчасного оновлення інформації, який може призвести до недостовірної оцінки стану полігону. Щоб уникнути цього, слід автоматизувати процес збору показників з сенсорів і систематично оновлювати базу даних.

4. Ризик недостатнього кадрового забезпечення, зокрема нестачі кваліфікованих фахівців для роботи з ГІС, моніторинговими системами та аналітичним програмним забезпеченням. Для його усунення потрібно передбачити навчальні програми та підвищення кваліфікації персоналу.

5. Ризик ігнорування громадськості, що може призвести до недовіри до системи моніторингу. Необхідно забезпечити прозорість роботи ІАСМ через публічний доступ до частини екологічних даних, регулярне інформування населення та взаємодію з місцевими громадами.

Також важливим етапом є розроблення плану реагування на надзвичайні ситуації, що має бути інтегрованим у функціонал ІАСМ. У цьому плані потрібно передбачити відповідальні особи, послідовність дій, доступ до резервних каналів зв'язку та механізми взаємодії з місцевими органами влади.

Таким чином, ІАСМ Здолбунівського полігону побутових відходів має стати не лише інструментом пасивного спостереження, а й активним засобом управління екологічною безпекою території, здатним ефективно реагувати на виклики як у звичайному режимі, так і в умовах надзвичайних ситуацій.

4.2.2. Впровадження сучасних цифрових рішень логістичного процесу сортування відходів. Інформаційні технології виступають важливим інструментом модернізації процесів збору, обліку, аналізу та контролю побутових відходів, забезпечуючи підвищення ефективності функціонування систем поводження з ними на локальному рівні. Досвід Здолбунівського сміттєзвалища свідчить, що впровадження сучасних цифрових рішень дозволяє не лише

оптимізувати логістику збору відходів, а й підвищити рівень екологічної безпеки регіону (рис.4.2.).

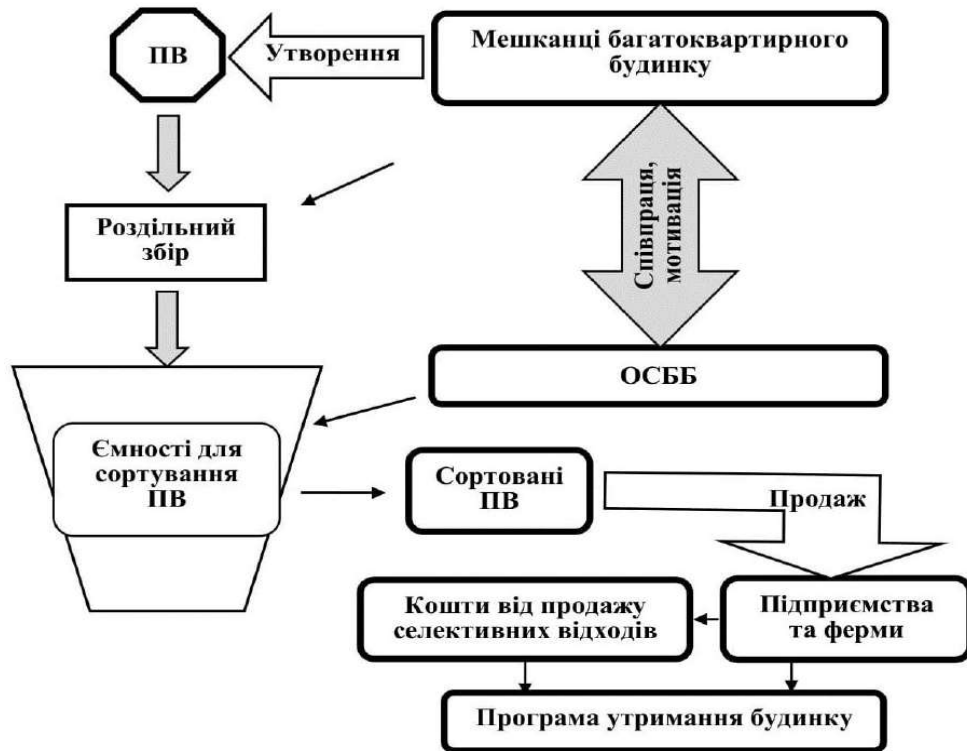


Рисунок 4.2. Схема логістичного процесу сортування відходів

Одним із перспективних напрямів удосконалення системи сортування є використання технології RFID-ідентифікації контейнерів і пакетів (Рис. 4.3.).

Застосування безконтактних радіочастотних міток забезпечує автоматизований облік побутових відходів, моніторинг їх походження та переміщення, що дозволяє значно зменшити втрати даних, мінімізувати людський фактор та підвищити точність обліку. На основі зібраної інформації здійснюється оптимізація маршрутів вивезення відходів, що сприяє зниженню експлуатаційних витрат і зменшенню викидів парникових газів від транспорту.

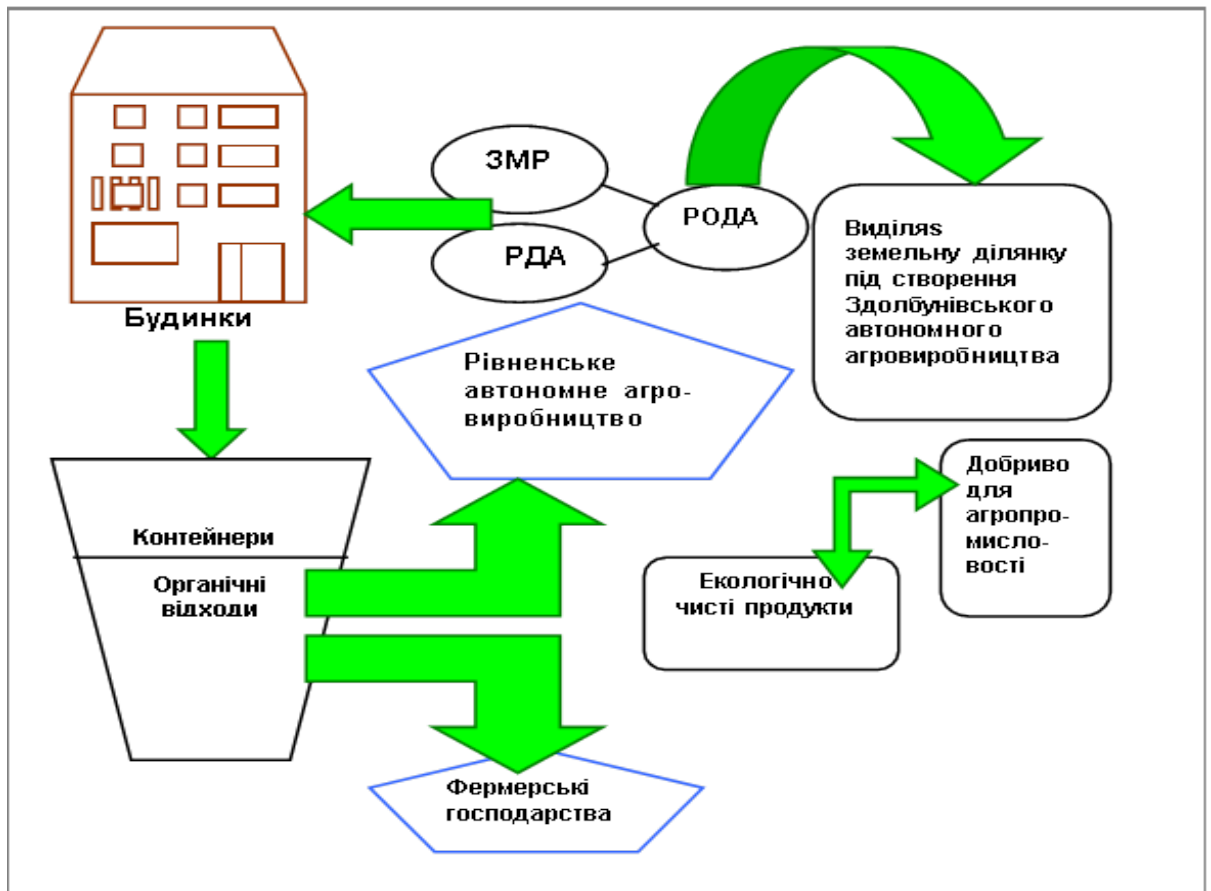


Рисунок 4.3. Схема логістичного процесу управління органічними відходами для ЖКГ

Інший важливий елемент — мобільні додатки для мешканців громад, які забезпечують інтерактивне інформування населення щодо правил роздільного збору сміття, розташування найближчих пунктів прийому вторинної сировини та графіків вивезення. Інформаційна підтримка на основі сучасних комунікаційних технологій сприяє формуванню екологічної культури громадян і стимулюванню участі у програмах сортування відходів.

4.2.3. Технології Інтернету речей у системі сортування побутових відходів. Інформаційно-аналітичні платформи виступають базою для централізованого збору, обробки та аналізу даних про обсяги, структуру та динаміку потоків побутових відходів. Використання таких платформ дозволяє

здійснювати прогнозування навантаження на інфраструктуру, моделювання сценаріїв поводження з відходами, а також забезпечує обґрунтування рішень щодо розвитку систем переробки та утилізації.

Значні можливості в удосконаленні моніторингу надають технології Інтернету речей (IoT). Розміщення сенсорних пристроїв на контейнерах для збору відходів забезпечує оперативне надходження даних про рівень їх заповнюваності, що дозволяє здійснювати адаптивне управління вивезенням сміття, своєчасно реагувати на критичні ситуації та запобігати утворенню несанкціонованих сміттєзвалищ. На прикладі Здолбунівського сміттєзвалища впровадження IoT-технологій сприяло покращенню контролю за експлуатаційним станом полігону, зменшенню навантаження на його потужності та поліпшенню санітарно-екологічного стану прилеглих територій.

Таким чином, інтеграція інформаційних технологій у систему сортування побутових відходів виступає важливою умовою для побудови стійких моделей управління відходами на місцевому рівні, сприяє мінімізації негативного впливу на довкілля та забезпечує поступовий перехід до принципів циркулярної економіки.

4.3. Інформаційний аналіз оцінювання рівня екологічної безпеки території досліджень

Оцінка рівня екологічної безпеки регіону Рівненської області є складним багатокомпонентним процесом, який включає інформаційний аналіз різноманітних природно-екологічних, техногенних та соціально-економічних факторів, що впливають на стан навколишнього середовища та здоров'я населення. Для проведення такої оцінки використовується комплексний підхід, що включає моніторинг природних ресурсів, оцінку рівня забруднення повітря, води та ґрунтів, а також аналіз впливу антропогенних факторів, таких як промисловість, сільське господарство та транспортування небезпечних вантажів. Одним із важливих етапів є визначення рівня забруднення атмосферного повітря, особливо у містах та прилеглих до них районах, де концентрація забруднюючих

речовин може значно перевищувати норми. Оцінка якості водних ресурсів є також критичною для регіону, зважаючи на наявність численних річок, водосховищ та підземних водоносних горизонтів. Особливу увагу приділяють аналізу стану річок, таких як Прип'ять та Горинь, що проходять через область, та можливому забрудненню від діяльності промислових підприємств, зокрема хімічної, енергетичної та машинобудівної галузей. Важливою складовою є також оцінка техногенних загроз, пов'язаних з наявністю старих шахт, складів токсичних відходів, а також потенційних ризиків, що виникають унаслідок активності атомної електростанції в сусідніх областях. Порушення екологічної безпеки може призвести до значних екологічних та соціальних наслідків, включаючи деградацію природних екосистем, втрату біорізноманіття, забруднення водних ресурсів та повітря, що негативно позначається на здоров'ї населення. Крім того, важливим аспектом є використання даних дистанційного зондування Землі для виявлення забруднених територій, моніторингу зміни ландшафтів та оцінки стану природних ресурсів. Інтеграція сучасних ГІС дає змогу точно визначити зони екологічного ризику, оцінити вплив різних факторів та розробити стратегії для зменшення екологічних загроз. Для забезпечення екологічної безпеки Рівненської області важливою є реалізація заходів, спрямованих на зменшення забруднення, захист природних екосистем, відновлення біорізноманіття та сталий розвиток економіки регіону. Сюди входять як державні ініціативи, так і участь місцевих громад у моніторингу та збереженні навколишнього середовища, що дозволяє ефективно реагувати на екологічні виклики та забезпечити сталий розвиток регіону. Високий рівень аграрної діяльності, особливо у вигляді інтенсивного землеробства та тваринництва, часто супроводжується негативними екологічними наслідками, такими як ерозія ґрунтів, надмірне використання хімічних добрив та пестицидів, що призводять до забруднення водних ресурсів і ґрунтів. Важливим є також питання стійкості екосистем до змін клімату, що впливає на аграрну продуктивність і може підвищити ризики для здоров'я населення через погіршення якості продовольства. Негативний вплив на екологічну безпеку регіону мають також процеси урбанізації, зокрема збільшення

забудови сільських та прибережних територій, що призводить до скорочення природних біотопів та зміни водообігу. Такі зміни можуть сприяти збільшенню кількості паводків і затоплень, що в свою чергу веде до значних екологічних та економічних втрат. У результаті зміни ландшафтів через забудову може виникати додатковий тиск на водні екосистеми, оскільки зменшується здатність природних середовищ до самоочищення. Інша важлива частина оцінки рівня екологічної безпеки Рівненської області — це аналіз стану природних ресурсів, зокрема лісів, які є важливим компонентом природного середовища області. Ліси області, серед яких значні ділянки є частиною Поліського природного комплексу, виконують важливі екологічні функції: очищення повітря, регулювання водного балансу, захист ґрунтів від ерозії, а також збереження біорізноманіття. Однак лісові масиви також піддаються загрозам через незаконні рубки, пожежі, а також через зміни клімату, які можуть посилювати уразливість лісових екосистем.

Аналіз стану біорізноманіття є ще одним важливим елементом оцінки екологічної безпеки області. Рівненська область багата на різноманітні природні комплекси, але через антропогенні фактори спостерігається скорочення чисельності деяких видів флори та фауни. Це відбувається через знищення природних середовищ існування, забруднення навколишнього середовища та зміни клімату. Збереження біорізноманіття є необхідною умовою для підтримки стабільності екосистем і забезпечення екологічної безпеки в цілому. Для покращення екологічної безпеки регіону необхідно застосовувати низку стратегічних заходів, серед яких розширення територій природоохоронного призначення, інтеграція принципів сталого розвитку в аграрну та промислову діяльність, а також активне впровадження інноваційних екологічних технологій. Крім того, необхідно посилити роль громадських організацій та місцевих органів влади у питаннях екологічної освіти, моніторингу та відновлення природних ресурсів. Розробка і впровадження екологічної політики, що орієнтується на запобігання техногенним катастрофам, зменшення забруднення та підвищення стійкості природних екосистем до змін, є важливим етапом для забезпечення сталого розвитку Рівненської області та підвищення якості життя її мешканців.

4.4. Метод вимірювання концентрації реорганізованих речовин на сміттєзвалищах

Метод вимірювання концентрації реорганізованих речовин на сміттєзвалищах є важливою складовою екологічного моніторингу, оскільки дозволяє оцінити рівень забруднення навколишнього середовища відходами та їх розкладу. Реорганізовані речовини можуть включати органічні сполуки, важкі метали, токсичні гази та інші шкідливі компоненти, що виділяються з органічних відходів на сміттєзвалищах. Вимірювання концентрації цих речовин необхідне для розробки стратегій управління відходами, а також для оцінки впливу сміттєзвалищ на екосистеми та здоров'я людини.

Основними методами вимірювання концентрації реорганізованих речовин є:

1. Аналіз проб ґрунту та води. Для оцінки рівня забруднення використовують аналізи проб ґрунту та води, що беруться з різних точок на території сміттєзвалища. Це дозволяє визначити, як відходи впливають на навколишнє середовище.

2. Метод газової хроматографії. Цей метод застосовується для вимірювання концентрації летких органічних сполук, таких як метан, аміак, сірководень, що утворюються внаслідок розкладу органічних відходів. Газова хроматографія дозволяє розділяти компоненти газових сумішей та вимірювати їх концентрацію з високою точністю.

3. Метод інфрачервоної спектроскопії. Цей метод використовується для вимірювання концентрації органічних речовин, таких як метан, етанол, вуглекислий газ тощо, у газових емісіях. В інфрачервоному спектрі певні органічні молекули поглинають світло на конкретних довжинах хвиль, що дозволяє визначити їх концентрацію.

4. Метод фотометрії. Фотометрія застосовується для визначення концентрації речовин, таких як важкі метали (свинець, кадмій, мідь), в рідких та твердих відходах. Це метод, який базується на вимірюванні інтенсивності світла, що поглинається речовиною при певній довжині хвилі.

5. Метод індуктивно- зв'язаної плазмової мас-спектрометрії (ICP-MS). ICP-MS використовується для вимірювання низьких концентрацій важких металів у пробах води та ґрунту. Цей метод дозволяє визначити концентрацію

Цей метод дозволяє отримати точні дані про стан сміттєзвалищ і визначити заходи для зменшення екологічних ризиків, таких як зниження концентрації шкідливих речовин у навколишньому середовищі.

4.5. Структура Інформаційно-аналітичної системи моніторингу (ІАСМ) Здолбунівського полігону побутових відходів

Структура Інформаційно-аналітичної системи моніторингу (ІАСМ) Здолбунівського полігону побутових відходів є комплексом взаємопов'язаних функціональних елементів, що забезпечують безперервний збір, зберігання, обробку, аналіз та візуалізацію екологічних даних для ефективного управління екологічною безпекою території.

Основні складові системи включають:

1. Модуль збору даних.
2. Модуль зберігання та обробки даних.
3. Геоінформаційний модуль.
4. Аналітичний модуль.
5. Модуль підтримки прийняття рішень.
6. Інформаційно-комунікаційний модуль.
7. Модуль захисту даних.

Логіка функціонування ІАСМ заключається в тому, що дані від сенсорів та польових спостережень автоматично потрапляють до центрального сховища → первинна обробка та перевірка → інтеграція у ГІС та аналітичні модулі → візуалізація на картах і в звітних формах → оцінка ризиків та моделювання сценаріїв → генерація управлінських рішень → інформування зацікавлених сторін (Рис. 4.4.).



Рисунок 4.4. Інформаційно-комунікаційні модулі Інформаційно-аналітичної системи моніторингу (ІАСМ) Здолбунівського полігону побутових відходів

Основою системи є модуль збору даних, який відповідає за отримання інформації з різноманітних джерел, включаючи стаціонарні сенсори якості повітря, води і ґрунтів, автоматичні станції контролю рівня фільтрату, мобільні лабораторії та засоби дистанційного зондування території за допомогою безпілотних літальних апаратів. Зібрана інформація надходить до центральної бази даних, яка виконує функції зберігання, первинної обробки, стандартизації та фільтрації даних. Центральна база інтегрується з геоінформаційною системою, що дозволяє візуалізувати об'єкти моніторингу на електронній карті, будувати тематичні шари, здійснювати просторовий аналіз, виявляти закономірності

забруднення та локалізувати джерела небезпеки. Аналітичний модуль ІАСМ обробляє отриману інформацію за допомогою сучасних математичних, статистичних та геоінформаційних методів, здійснює моделювання прогнозних сценаріїв розвитку екологічної ситуації, оцінює ризики для підземних вод, атмосфери, ґрунтів, а також дозволяє будувати просторово-часові моделі поширення забруднювачів. Важливу роль у системі відіграє модуль підтримки прийняття рішень, який, на основі оброблених даних, формує управлінські пропозиції щодо здійснення природоохоронних заходів, визначення пріоритетних напрямків робіт, попередження та ліквідації надзвичайних ситуацій. Інформаційно-комунікаційний модуль забезпечує оперативну взаємодію з місцевими органами влади, спеціалізованими службами, науковими установами та громадськістю, надаючи доступ до актуальної екологічної інформації через електронні сервіси та інформаційні платформи. Структура ІАСМ включає також модуль захисту даних, який гарантує безпечне зберігання інформації, захист від несанкціонованого доступу, резервне копіювання та використання сучасних технологій кібербезпеки. Функціонування ІАСМ Здолбунівського полігону побутових відходів реалізується за чіткою логікою: дані від сенсорів та польових спостережень автоматично надходять до бази даних, проходять первинну обробку і перевірку, інтегруються в геоінформаційну систему для подальшої візуалізації та аналізу, результати аналізу використовуються для оцінки ризиків, прогнозування сценаріїв розвитку та формування управлінських рішень, після чого інформація оперативно передається відповідальним суб'єктам моніторингу та оприлюднюється для зацікавлених сторін. Така структура дозволяє забезпечити науково обґрунтоване, технологічно підтримане управління екологічною безпекою полігону в режимі реального часу.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4.

Застосування інформаційних технологій у системі сортування побутових відходів дозволяє створити інтегровану екосистему збору, обліку, моніторингу та аналізу потоків відходів на локальному рівні. Досвід функціонування Здолбунівського сміттєзвалища демонструє, що впровадження RFID-технологій, мобільних додатків, інформаційно-аналітичних платформ та IoT-рішень сприяє підвищенню ефективності управління відходами, скороченню витрат, поліпшенню екологічного стану територій та залученню громади до процесів сортування. Впровадження таких технологічних інновацій є важливим кроком на шляху до реалізації стратегій сталого розвитку та побудови циркулярної економіки в Україні

1. Проведено наукове обґрунтування необхідності створення інтегрованої інформаційно-аналітичної системи моніторингу (IACM) для Здолбунівського полігону побутових відходів. З урахуванням складної екологічної ситуації та наявності численних джерел небезпеки визначено стратегічні та тактичні завдання моніторингу елементів довкілля, зокрема підземних і поверхневих вод, ґрунтів, атмосферного повітря, екзогенних геологічних процесів.

2. Запропоновано архітектуру IACM, яка складається з модулів збору, зберігання, обробки, аналізу та візуалізації даних, інтегрованих у геоінформаційне середовище. Система передбачає автоматизацію процесів моніторингу із застосуванням сучасних технологій збору даних, дистанційного зондування Землі, безпілотних літальних апаратів та сенсорних мереж.

3. Розроблено етапи реалізації просторового аналізу та візуалізації екологічних даних, що включають створення концептуальної моделі системи, організацію збору даних, формування банку даних і тематичних карт, проведення аналітичної обробки даних та впровадження механізмів підтримки прийняття управлінських рішень.

4. Проведено аналіз потенційних ризиків, які можуть виникати в процесі функціонування IACM, серед яких виділено ризики втрати даних, несумісності форматів інформації, невчасного оновлення даних, кадрової недостатності та

недостатньої прозорості для громадськості. Запропоновано заходи для їх мінімізації.

5. Показано доцільність інтеграції сучасних цифрових рішень у систему логістики сортування побутових відходів на Здолбунівському полігоні, зокрема RFID-ідентифікації контейнерів, мобільних додатків для громадськості та технологій Інтернету речей для моніторингу заповнюваності контейнерів та ефективного управління маршрутами вивезення відходів.

6. Узагальнено, що створення і впровадження ІАСМ сприятиме підвищенню рівня екологічної безпеки полігону побутових відходів, покращенню якості моніторингу стану довкілля, підвищенню ефективності природоохоронних заходів, зміцненню науково-аналітичної бази управління відходами та відповідатиме сучасним міжнародним екологічним стандартам.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну наукову задачу — розробку інформаційно-аналітичної системи моніторингу екологічного впливу полігонів твердих побутових відходів із застосуванням сучасних інформаційних технологій: ГІС, ДЗЗ, автоматизованого аналізу даних і цифрового моделювання. Інтеграція цих інструментів дозволила забезпечити високоточне оцінювання екологічного стану територій, прогнозування ризиків і обґрунтування рішень щодо мінімізації впливу полігонів на довкілля. Отримані результати мають прикладне значення для розвитку екологічного моніторингу та підтримки сталого управління відходами в Україні.

Основні результати роботи:

1. Удосконалено концептуальну модель інтегрованої інформаційно-аналітичної системи моніторингу впливу полігонів твердих побутових відходів на довкілля, яка базується на об'єднанні ГІС, ДЗЗ та цифрового картографування.

2. Побудовано математичні моделі прогнозування екологічних змін у зоні впливу полігонів ТПВ з використанням методів просторового моделювання, матричних рівнянь показників якості середовища та аналізу просторово-часових даних.

3. Розроблено і впроваджено Інформаційно-комунікаційні модулі, що забезпечують автоматизовану обробку екологічних даних, інтеграцію результатів дистанційного зондування, польових досліджень і статистичних спостережень у єдине інформаційне середовище.

4. Вперше за допомогою рентгенофлуоресцентного аналізу встановлено елементний склад ґрунтів Здовбицького полігону ТПВ та визначено коефіцієнти забруднення важкими металами (Zn, Mn, Cd, Sr), що стало основою для цифрового картографування забруднених зон.

5. Проведено просторово-часовий моніторинг стану підземних і поверхневих вод із використанням геоінформаційних технологій, що дозволило вперше виявити закономірності поширення забруднювачів і сформувати картографічну модель зон ризику для водних ресурсів.

6. Розроблено методику визначення об'ємів та геометричних характеристик полігонів ТПВ за даними БПЛА та архівних матеріалів дистанційного зондування, що забезпечує високу точність оцінки змін полігону в динаміці.

7. Вдосконалено алгоритми автоматизованого моніторингу температурних аномалій сміттєзвалищ за супутниковими знімками Landsat-8 у середовищі Google Earth Engine, що дозволило оперативно виявляти потенційні підповерхневі пожежі та деградаційні процеси.

8. Запропоновано цифрові моделі оцінки впливу полігонів на ландшафти та біорізноманіття, що базуються на багатоспектральному аналізі супутникових зображень та моделюванні змін у структурі природних екосистем.

9. Практично реалізовано інтегровану інформаційно-аналітичну платформу, що включає в себе автоматизовані засоби збору, обробки, візуалізації та передачі екологічної інформації для органів державного управління, місцевого самоврядування і наукових установ.

Таким чином, результати проведеного дослідження дозволили сформувати єдину інтегровану інформаційно-аналітичну систему моніторингу полігонів твердих побутових відходів, що поєднує сучасні інформаційні технології дистанційного зондування, геоінформаційного аналізу та цифрового моделювання, забезпечуючи підвищення точності прогнозів екологічного стану та підтримку прийняття рішень у сфері екологічної безпеки. Запропоновані підходи мають вагоме значення для розвитку системи управління відходами України в післявоєнний період і відповідають європейським екологічним стандартам.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Азімов О.Т., Злобіна К.С., Кармазиненко С.П., Кураєва І.В., Шевчук О.В. Моніторинг техногенного навантаження на водойми районів захоронення твердих побутових відходів (на прикладі Київського полігона № 5). Перші практичні дії та проблемні питання реалізації Закону України «Про управління відходами»: зб. матеріалів Нац. форуму «Поводження з відходами в Україні: законодавство, економіка, технології» (м. Івано-Франківськ, 21-23 листоп. 2023 р.). Київ: Центр екол. освіти та інформації, 2023. С. 268–272. ISBN 978-617-7130-22-1. <https://drive.google.com/file/d/1J-SorpNwbgr6JlkKWsQlvftKklZJnZAR/view?usp=sharing>
2. Азімов О.Т., Томченко О.В., Шевчук О.В. Аерокосмічний аспект просторово-часового аналізу змін в екосистемах районів захоронення побутових відходів. Інноваційні технології: Матеріали наук.-техн. конф. студентів, аспірантів, докторантів та молодих учених (м. Київ, 2022 р.).
3. Азімов О.Т., Томченко О.В., Шевчук О.В. Аналіз просторово-часових змін в екосистемах районів сміттєзвалищ муніципальних відходів з застосуванням дистанційних і ГІС-даних // Екологічна безпека та технології захисту довкілля. – 2021. – № 3. – С. 17–21. http://npchornobyl.com.ua/wp-content/uploads/2022/06/N3_2021.pdf
4. Азімов О.Т., Томченко О.В., Шевчук О.В. Просторово-часовий аналіз змін в екосистемах районів локалізації муніципальних відходів із застосуванням геоінформаційних систем і даних дистанційних знімачів. Укр. геогр. журн. 2024. № 2 (126). С. 51–60. <https://doi.org/10.15407/ugz2024.02.051>. ISSN 1561-4980. Режим доступу: <https://ukrgeojournal.org.ua/uk/node/819>
5. Азімов О.Т., Шевчук О.В. Впровадження сучасних ДЗЗ/ГІС-технологій з метою моніторингу чинників негативного екологічного впливу на довкілля полігонів захоронення відходів. Колективна монограф. за матеріалами ХІХ Міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних

ситуаціях: тенденції 2020 року» (Київ, 06-07 жовт. 2020 р.). За заг. ред. С.О. Довгого. К.: ТОВ «Вид-во «Юстон», 2020. С. 63–65. https://itgip.org/wp-content/uploads/2020/10/Збірка_2020_1.pdf.

6. Андрущенко Р. Б., Бескостий А. Д., Зайцев С. В., Усов Я. Ю., Письменюк М. А., Василенко В. М.. Методи підвищення цілісності пакетів передачі даних систем публічного управління. Тридцята міжнародна науково-практична конференція «Математичне та імітаційне моделювання систем МОДС 2018» (м. Київ-Чернігів-Жукін, 25 - 29 червня 2018 р.) М-во освіти і науки України, Нац. Акад. наук України, Академія технологічних наук України, Інженерна академія України та ін. – Чернігів : ЧНТУ, 2018. С. 139–141.

7. Балюк С. А. Оцінка забруднення зрошувальної води і ґрунтів важкими металами / С. А. Балюк, В. Я. Ладних, Л. І. Мошник // Вісник аграрної науки. – 2003. – №1. – С. 65 – 68.

8. Василенко В. М. Адаптивний вибор параметров турбокодов в условиях действия мощных шумовых помех. Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях : зб. наук. праць за матеріалами XVII міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, 25 - 26 вересня 2018 р.). К. ; Х. : НАН України, Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору [та ін.], 2018. С. 106–108.

9. Василенко В. М. Аналіз ефективності перемешувачів турбокодів. III Міжнародна науково-практична конференція «Теорія та практика актуальних наукових досліджень» (м. Запоріжжя, 2018 р.). С. 27–31.

10. Деркачов Е. А. // Проблеми збору, переробки та утилізації відходів: сб. наук. ст.IV Міжнар.наук.–практ. конф.–Одеса, 2002. – С.224–227.

11. Довгань С. А. // Материалы 2–го Международного Конгресса по управлению отходами. 2001г.– С.139.

12. Експериментально-аналітичні дослідження технічного стану залізничних протизсувних споруд під дією динамічних навантажень / Калюх Ю. І., Дунін В. А., Берчун Я. О., Самойленко С. М. // Екологічна безпека. – 2017. – № 3-4 (24). – С. 148-155.

13. Елементи теорії випадкових процесів: Навч. посіб. / Ю. К. Рудавський, П. П. Костробій, О. Ю. Лозинський, Д. В. Уханська; Нац. ун-т «Львів. політехніка». — Л., 2004. — 239 с.

14. Зайцев С. В. Методи та моделі забезпечення сталої достовірності інформації у безпроводових системах передачі даних /Зайцев С. В. – Чернігів, 2016. – 397 с.

15. Закон України "Про поводження з радіоактивними відходами" введений в дію Постановою Верховної Ради України від 30 червня 1995 року, № 255/95-ВР [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/255/95-вр#Text>

16. Закон України «Про відходи» [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/187/98-вр#Text>

17. Закон України «Про забезпечення санітарного та епідемічного благополуччя населення» [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4004-12#Text>

18. Закон України «Про Основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» № 2697-VIII. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2697-19#Text>.

19. Закон України «Про оцінку впливу на довкілля» від 23.05.2017. Відомості Верховної Ради (ВВР), 2017, № 29, ст.315 [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19#Text>

20. Кодекс України про надра, введений в дію Постановою Верховної Ради України від 27.07.1994 року № 133/94-ВР [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/132/94-вр#Text>

21. О.Т.Азімов, О.В.Шевчук, К.О.Азімова. Геоінформаційні системи в дослідженні чинників забруднення довкілля територій сміттєзвалищ: стан та перспективи / Геоінформатика.2020. №2. с.69-88. URL: <http://www.geology.com.ua/>

22. Про можливість багатохвильової ідентифікації дефектів у палях / Трофимчук О. М., Калюх Ю. І., Дунін В. А., Берчун Я. О.// Кибернетика и системный анализ, No 4, 2018. – С. 98-108.

23. Триснюк В. М. та Триснюк Т. В. Інформаційні технології та просторово-часові методи регіональної системи моніторингу / Триснюк В. М., Триснюк Т. В. // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування: науково-технічний журнал. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (ІФНТУНГ); Івано-Франківськ: Симфонія форте. – 2014, No2 (10) – С. 120-128.

24. Триснюк В. М., Павлишин А. В., Курило А. В.. Аеро геолокаційний екологічний контроль. Monografia pokonferencyjna science, research, development Zbiór artykułów naukowych recenzowanych. Berlin. С. 46-47.

25. Трофимчук О. М., Василенко В. М., Зайцев С. В. Аналіз систем автоматичного запиту на повторну передачу. Математичне моделювання в економіці, 2018. Том. 3 (12). С. 41 – 51.

26. Шевчук О.В., Азімов О.Т. Аналіз даних системи гідрогеологічного моніторингу районів впливу полігонів твердих побутових відходів: моделювання та прогнозування. 6-й Міжнар. молодіжний конгрес «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування»: Зб. матеріалів (Львів, 09-10 лютого 2021 р.). Львів: ТзОВ «ЗУКЦ», 2021. С. 250. DOI: 10.23939/book.ecocongress.2021.http://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2021/jan/23053/youthcongressproceedings2021_1.pdf.

27. Шевчук О.В., Азімов О.Т. Впровадження системи екологічного моніторингу сміттєзвалищ шляхом використання безпілотних літальних апаратів / Колективна монограф. за матеріалами 20-ї Міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: виклики 2021 року» (м. Київ, 04-08 жовт. 2021 р.); За заг. ред. С.О. Довгого. Київ: ТОВ «Вид-во «Юстон», 2021. С. 117–121. https://itgip.org/wp-content/uploads/2021/10/1_Збірка_2021.pdf

28. Шевчук О.В., Азімов О.Т. Застосування ДЗЗ/ГІС-технологій для моніторингу місць захоронення відходів. Int. Sci. and Practical Conf. «Science, engineering and technologies: Current issues and research» (March 12–13 2021, Prague, The Czech Republic). Prague: Izdevnieciba «Baltija Publishing», 2021. P. 62–66. http://dspace.puet.edu.ua/bitstream/123456789/10756/1/conf_CTU_tech_%D0%9C%D0%B0%D1%80%D1%82_2021%20%281%29.pdf

29. Шевчук О.В., Азімов О.Т. Моніторинг Здолбунівського сміттєзвалища ТПВ (Рівненська область, Україна) із застосуванням безпілотного літального апарату / Колективна монограф. за матеріалами 20-ї Міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: виклики 2021 року» (м. Київ, 04-08 жовт. 2021 р.); За заг. ред. С.О. Довгого. Київ: ТОВ «Вид-во «Юстон», 2021. С. 121–126. https://itgip.org/wp-content/uploads/2021/10/1_Збірка_2021.pdf

30. Шевчук О.В., Азімов О.Т. Сутність геоінформаційного моніторингу полігонів твердих побутових відходів // Інноваційні технології: Матеріали XVI наук.-техн. конф. студентів, аспірантів, докторантів та молодих учених (м. Київ, 20-21 листоп. 2019 р.). За заг. ред. Бабікової К.О., Мельничук Л.М. – К.: ІНТЛ НАУ, 2019. – С. 288–293. – Режим доступу: http://cnt.nau.edu.ua/sites/default/files/pictures/zbirnuk_20_11_19-1-min.pdf.

31. Шевчук О.В., Томченко О.В., Андреев А.А., Азімов О.Т. Температурне картографування ландшафтів у районах сміттєзвалищ за різночасовими даними космічних зйомок. Інноваційні технології: Матеріали наук.-техн. конф. студентів, аспірантів, докторантів та молодих учених (м. Київ, 2022 р.).

32. Шевченко О. А. Еколого–гігієнічна оцінка ступеня небезпеки території муніципальних звалищ та заходи щодо їх оздоровлення / Шевченко О. А.

33. Aizhong Ding, Zonghu Zhang, Jiamo Fu and Lirong Cheng, Biological control of leachate from municipal landfills /Aizhong Ding, Zonghu Zhang, Jiamo Fu and Lirong Cheng //Chemosphere, 2001, V.44, Issue 1 – P. 1–8.

34. Azimov O.T., Shevchuk O.V. Geoinformation systems in monitoring studies of environmental pollution factors in the areas of municipal solid waste landfills. 19th EAGE Int. Conf. on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects (11-14 May 2020, Kyiv, Ukraine): Conference Proceedings. Vol. 2020. P. 1–7. (файл з статтею додається). DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo111>.

35. Azimov O.T., Shevchuk O.V. Geoinformation systems in monitoring studies of environmental pollution factors in the areas of municipal solid waste landfills. 19th EAGE Int. Conf. on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects (11-14 May 2020, Kyiv, Ukraine): Conference Proceedings. Vol. 2020. P. 1–7. (файл з статтею додається). DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo111>.

36. Azimov O.T., Shevchuk O.V. (2020) Modeling and forecasting the impact of solid waste landfill on groundwater (the landfill in Zdolbuniv district of Rivne region, Ukraine, as an example). Conference Proceedings, XIV International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”, Nov 2020, Volume 2020, p. 1 – 6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056078>

37. Azimov O.T., Shevchuk O.V. (2020) Modeling and forecasting the impact of solid waste landfill on groundwater (the landfill in Zdolbuniv district of Rivne region, Ukraine, as an example). Conference Proceedings, XIV International Scientific Conference “Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment”, Nov 2020, Volume 2020, p. 1 – 6. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056078>

38. Azimov, O.T., Shevchuk, O.V., Azimova, K.O., Dorofey, Ye.M. and Tomchenko, O.V. (2020). Integration of GIS and RSE aiming to the effective monitoring of the surroundings of landfills. *Ukrainian J. Remote Sens.*, 27, 4–12. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2020.27.183>

39. Azimov, O.T., Shevchuk, O.V., Azimova, K.O., Dorofey, Ye.M. and Tomchenko, O.V. (2020). Integration of GIS and RSE aiming to the effective monitoring of the surroundings of landfills. *Ukrainian J. Remote Sens.*, 27, 4–12. <https://doi.org/10.36023/ujrs.2020.27.183>

40. Berrou C. Near optimum error correcting coding and decoding: turbo-codes /C. Berrou, A. Glavieux // IEEE Trans. On Commun. – 1996. – Vol. 44 (10). – P. 1261 – 1271. DOI: 10.1109/26.539767.

41. Bukhari S. M. and Giorgi J. B. (2013) “Ni doped Sm_{0.95}Ce_{0.05}FeO₃-d perovskite based sensors for hydrogen detection”, Sens. Actuators B, vol. 181, pp. 153–158.

42. Butin O. Z., Voytykhovska A. S. // Natural Water Resources of the Carpathian region (problems of protection and rational use), May 29–30, 2007, Lviv. P.169–174.

43. Chung S. T. Degrees of Freedom in Adaptive Modulation: A Unified View / S. T. Chung, A. J. Goldsmith // IEEE Transactions on Commun. – 2001. – Vol. 49. – P. 1561 – 1571.

44. Cox R.V. Subband speech coding and matched convolutional channel coding for mobile radio channels / R. V. Cox, J. Hagenauer, N. Seshadri, C.-E. W. Sundberg // IEEE Trans. Signal Proces.– 1991. – Vol. 39. – P.1717 – 1731.

45. Divsalar D. Multiple Turbo Codes for Deep-Space Communications / Divsalar D., F. Pollara // TDA Progress Report. Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology – 1995. – Vol. 34, no. 8. P. 42-121

46. Dynamic response of a pile embedded into a layered soil / Martinelli M., Burghignoli A., Callisto L. // Soil Dynamics and Earthquake Engineering. — 87, 2016. — P. 16-28.

47. Experimental monitoring and dynamic certification of building structures / Marienkov M. H., Dunin V. A., Margvelashvili N., Farenjuk G. G., Berchun Ya. O. // Наука та будівництво. –2019. – No 22(4). – С. 33-44.

48. Goldsmith A. J. Adaptive Coded Modulation for Fading Channels/ A. J. Goldsmith, S. G. Chua // IEEE Transactions on Commun. – 1998. – Vol. 46. – P. 595 – 602.

49. Identification of defects of the piles with reflected waves / Lebid O., Kaliukh I., Berchun Ya., Chernyshev D. // Екологічна безпека. –2018. – No 1 (25). – С. 64-76.

50. Impact of Sequential Ground Motion Pairing on Mainshock-Aftershock Structural Response and Collapse Performance Assessment / M. Shokrabadi, H. V. Burton, J. P. Stewart // *Structural Engineering*. — 144 (10), 2018. — 04018177.

51. Kamio Y. Performance of modulation-level-control led adaptive-modulation under limited transmission delay time for land mobile communications / Y. Kamio, S. Sampei, H. Sasaoka, and N. Morinaga // *Proceedings of the IEEE VTC'95– 1995*. – P.221 – 225.

52. Khavkin K. Landslide hazard and stress-strain state of landslide protection structures in seismically hazardous regions of Ukraine (for example, Bukovina): thesis for Technical degree by specialty 05.23.02 - "Fundamentals and foundations" /Khavkin. K. — K.: SRIBK, 2015. — 188 p.

53. Ling Zhang, Jifan Hu, Peng Song, Hongwei Qin, Kang An, Xingdong Wang and Minhua Jiang (2006) “CO-sensing properties of perovskite $\text{La}_{0.68}\text{Pb}_{0.32}\text{FeO}_3$ ”, *Sens. Actuators*, vol. 119, pp. 315–318.

54. Mulmi S., Hassan A., Pereira-Almao P. and Thangadurai V. (2013) “Detecting CO_2 at ppm level in synthetic air using mixed conducting double perovskite-type metal oxides”, *Sens. Actuators*, vol. 176, pp. 598–605.

55. O. Shevchuk . A. Andreiev, O. Azimov, O. Tomchenko. Geoinformation technology of temperature mapping of dumps based on remote sensing of the Earth. XVI International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment» 15-18 November 2022, Kyiv, Ukraine.

56. O. Shevchuk. A. Andreiev, O. Azimov, O. Tomchenko. Geoinformation technology of temperature mapping of dumps based on remote sensing of the Earth. XVI International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment» 15-18 November 2022, Kyiv, Ukraine.

57. O. Shevchuk. Implementation of the system of environmental monitoring of dumps by using unmanned aerial vehicles.. XVI International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment» 15-18 November 2022, Kyiv, Ukraine.

58. O. Shevchuk. Implementation of the system of environmental monitoring of dumps by using unmanned aerial vehicles.. XVI International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment» 15-18 November 2022, Kyiv, Ukraine.

59. Otsuki S. Square – QAM adaptive modulation/ TDMA / TDD system using modulation level estimation with Walsh function / S. Otsuki, S. Sampei, N. Morinaga // Electronics Letters. – 1995. – Vol. 31. – P. 169 – 171.

60. Рибак С. Стан та ступінь деградації природних комплексів під впливом існування Львівського міського сміттєзвалища та еколого–економічна оцінка наслідків його діяльності на перспективу / Рибак С., Томашівський О.//Проблеми та перспективи розвитку Української науки на початку третього тисячоліття: зб. наук. Праць III Всеукраїнської науково–практичної Інтернет–конференції. Переяслав– Хмельницький, 14–16 грудня 2011р. – С.9–12.

61. Pohrebennyk V., Podolchak I. The efficiency of waste water treatment landfill // Pohrebennyk V., Podolchak I. // International scientific conference “New Trends in Ecological and Biological Research”, September 9th–11th, 2015, University of Prešov in Prešov, Slovak Republic. –Prešov, 2015.–P.103.

62. Rebecca J. Slack, Jan R. Gronow, David H. Hall, Nikolaos Voulvoulis, Household hazardous waste disposal to landfill: Using LandSim to model leachate migration / J. Rebecca, R. Slack Jan Gronow, David H. Hall, Nikolaos Voulvoulis //Sci.TotalEnviron.2007.–P.501–509.

63. Rothschild A. and Komem Y. (2004) “The effect of grain size on the sensitivity of nanocrystalline metal-oxide gas sensors”, J. Appl. Phys., vol. 95, pp. 6374– 6380.

64. Shevchuk O.V., Azimov O.T., Tomchenko O.V. Remote sensing monitoring of the landfill sites as a factor of adverse environmental impact [Електронний ресурс]. 20th EAGE Int. Conf. on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects (11-14 May 2021, Kyiv, Ukraine): Proc. Vol. 2021. P. 1–7 <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521054>

65. Shevchuk O.V., Azimov O.T., Tomchenko O.V. Remote sensing monitoring of the landfill sites as a factor of adverse environmental impact [Електронний ресурс].

20th EAGE Int. Conf. on Geoinformatics – Theoretical and Applied Aspects (11-14 May 2021, Kyiv, Ukraine): Proc. Vol. 2021. P. 1–7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521054>

66. Taylor RF, Schultz JS (eds) Handbook of chemical sensors and biosensors. IOP Publishing, Bristol (1996)

67. Trysnyuk V. M., Shumeiko V. O., Trysnyuk T. V., Kurylo A. V., Golovan Y. M., Myronchuk V. V. [2020]. Ecological safety of the Carpathian region in the conditions of technogenic pilot air pollution. Collection of scientific works "Control, navigation and communication systems". Poltava National Technical University named after Yuri Kondratyuk. Issue 1 (59) 2020, P. 127-131.

68. Trysnyuk V., Prystupa V., Trysnyuk T., Vasylenko V., Kurylo A. Comprehensive environmental monitoring based on aerospace and ground research data Geoinformatics 2020 11-14 May 2020, Kyiv, Ukraine p.1 – 4. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.2020geo066>.

69. Vishwanath S. Adaptive turbo-coded modulation for flat-fading channels / Vishwanath S., Goldsmith A. // IEEE Transactions on Communications. – 2003. – Vol. 51. – P. 964–972.

70. Vucetic B. An adaptive coding scheme for time-varying channels / B. Vucetic // IEEE Transactions on Communications. – 1991. – Vol. 39. – P. 653 – 663.

71. Харченко О.В. Розвідувальні безпілотні авіаційні комплекси у єдиній системі повітряно го спостереження в Україні /О.В. Харченко, С.О. Богославець // Збірник наукових праць державного науково-дослідного ін-ту авіації. – 2013. – Вип. 16. – С. 6-12.

72. Yoshiteru Itagaki, Masami Mori, Yuuki Hosoya, Hiromichi Aono and Yoshihiko Sadaoka (2007) “O₃ and NO₂ sensing properties of SmFe_{1-x}Co_xO₃”, Sensors and Actuators B, vol. 122, pp. 315–320.

73. Yun L. C. Variable Quality of Service in CDMA systems by statistical power control / L. C. Yun, D. G. Messerschmitt // IEEE Intl. Commun. Conf. Rec.– 1995. – P.713 – 719.

ДОДАТОК А

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ІТГП НАН України
член-кореспондент НАН України

 О.М. Трофимчук

2021 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ЦАКДЗ ІГН НАН України
член-кореспондент НАН України

 М.О. Пonomарев

2021 р.

«21» листопада



ЗАТВЕРДЖУЮ

Ректор ДЗ «Державна екологічна академія
післядипломної освіти та управління»
член-кореспондент НАН України

 О.І. Бондар

2021 р.

«02» листопада



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ


(приймання-передачі матеріалів науково-дослідних розробок)

Ми, що нижче підписалися, провідний науковий співробітник Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України» (ЦАКДЗ ІГН НАН України) Азімов О.Т., з одного боку, та директор Навчально-наукового інституту екобезпеки та управління Державного закладу (ДЗ) «Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління» Улицький О.А., з іншого боку, склали цей акт про те, що Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору (ІТГП) та ЦАКДЗ передають, а ДЗ «Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління» приймає «Методичну рекомендацію стосовно запровадження комплексу геоінформаційного забезпечення досліджень і робіт щодо поводження з геологічним середовищем, як субстратом локалізації твердих побутових відходів», викладену на 14-и сторінках, що містять 2 рисунки і «Список використаних джерел» з 41 найменування (автори: науковий керівник аспіранта О.Т. Азімов, аспірант ІТГП НАН України О.В. Шевчук).

«Методична рекомендація...» використовуватиметься під час виконання заходів з формування ресурсоефективних технологій на етапах розвитку стратегічного потенціалу екологічної безпеки та при побудові інтегрованої системи управління екологічною безпекою за допомогою ГІС-технологій з застосуванням космічних систем дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), а також як інформативний матеріал у процесі популяризації екологічної освіти під час переходу до системи інтегрованого управління природоохоронною складовою в галузі економіки.

Від ІТГП НАН України
та ЦАКДЗ ІГН НАН України

Науковий керівник аспіранта
доктор геол. наук,
старший науковий співробітник

 О.Т. Азімов

«29» жовтня 2021 р.

Від ДЗ «Державна екологічна академія
післядипломної освіти та управління»

Директор Навчально-наукового інституту
екобезпеки та управління
доктор геол. наук, доцент

 О.А. Улицький

«01» листопада 2021 р.

ДОДАТОК Б

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ЦАКДЗ ІГН НАН України
член-кореспондент НАН України


Михайло Потоп

« 28 » вересня 2022 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник Міністра
розвитку громад та територій України


Наталія Козловська

« 21 » жовтня 2022 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор ІТГІП НАН України
член-кореспондент НАН України


Олександр Трофимчук

« 29 » вересня 2022 р.




АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

(приймання-передачі матеріалів науково-дослідних розробок)

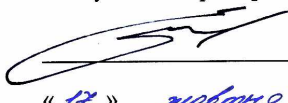
Ми, що нижче підписалися, провідний науковий співробітник Державної установи «Науковий центр аерокосмічних досліджень Землі Інституту геологічних наук НАН України» (ЦАКДЗ ІГН НАН України) Азімов О.Т., з одного боку, та директор Директорату просторового планування територій та архітектури Міністерства розвитку громад та територій України (Мінрегіон) Плащенко Є.М., з іншого боку, склали цей акт про те, що ЦАКДЗ ІГН НАН України та Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України (ІТГІП НАН України) передають, а Мінрегіон приймає «Пояснювальну записку про результати аналізу просторово-часових змін в екосистемах району Здовбицького сміттєзвалища муніципальних відходів (Здолбунівський район Рівненської області) з застосуванням дистанційних і ГІС-даних», викладену на 10-и сторінках, що містять 5 рисунків, одну таблицю і список літератури з 29 найменувань (автори: від ЦАКДЗ ІГН НАН України – доктор геол. наук, старший наук. співробітник, науковий керівник аспіранта О.Т. Азімов, канд. техн. наук О.В. Томченко; від ІТГІП НАН України – аспірант О.В. Шевчук).

«Пояснювальна записка ...» використовуватиметься як інформативний матеріал у процесі впровадження у структурні підрозділи Мінрегіону технологій оперативного моніторингу за екосистемами в районах полігонів і сміттєзвалищ захоронення твердих побутових відходів.

Від ЦАКДЗ ІГН НАН України
та ІТГІП НАН УкраїниДоктор геол. наук,
старший науковий співробітник,
науковий керівник аспіранта


Олександр Азімов

« 28 » вересня 2022 р.

Від Міністерства розвитку громад
та територій УкраїниДиректор Директорату просторового
планування територій та архітектури


Євген Плащенко

« 17 » жовтня 2022 р.