

УДК 528.71

В. А. ЛОЗИНСЬКИЙ^{1*}, В. І. НИКУЛШИН², К. Р. ТРЕТЯК³, Є. О. ШИЛО⁴

^{1,2} Кафедра картографії та геопросторового моделювання, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013, тел. 098-71-31-398, ел. пошта: viktor.lozynskyi@gmail.com

³ Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013

⁴ Кафедра інженерної геодезії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ОБ'ЄМУ ЛЬВІВСЬКОГО ПОЛІГОНУ ТПВ З ВИКОРИСТАННЯМ АРХІВНИХ КАРТОГРАФІЧНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА БПЛА TRIMBLE UX-5

Мета. Львівський полігон твердих побутових відходів має певні особливості, які повинні враховуватися під час розроблення методики визначення об'єму. А саме – початковий рельєф з сильною розчленованістю та перепадом висот більше як 70 м унеможлиблює задавання початкової горизонтальної площини під час визначення об'єму. Що стосується сучасної поверхні смітцевого тіла, то її ухили змінюються у межах від 0 до 85°, а перепад висот становить більше як 80 м. Це призводить до значних похибок за рельєф під час виконання аерофотознімання. Основною метою роботи є розроблення методики визначення об'єму Львівського полігону твердих побутових відходів із використанням архівних картографічних матеріалів та даних аерофотознімання станом на жовтень 2015 року з урахуванням особливостей досліджуваного об'єкта.

Методика та результати роботи. Незважаючи на розвиток сучасних технологій та цифрової картографії, паперові карти залишаються надалі джерелом отримання інформації, яка може використовуватись в подальшому для виконання багатьох наукових задач. Отримання даних для визначення об'ємів полігонів твердих побутових відходів можливе за допомогою дистанційних та контактних методів. Серед дистанційних методів великого застосування набувають безпілотні літальні апарати. Відповідно до поставленої мети ми відтворили початковий рельєф полігону ТПВ станом на 1957 рік. Виконано аерофотознімання Львівського полігону ТПВ станом на жовтень 2015 року із застосуванням БПЛА TRIMBLE UX-5. Визначено об'єм та площу полігону. Експериментально встановлено, що визначення об'ємів потрібно виконувати за TIN-моделями. А використання GRID-моделей з кроком від 5 см до 20 м не дає можливості визначити об'єм Львівського полігону ТПВ. Розраховано оцінку точності визначення об'єму Львівського полігону твердих побутових відходів. Отримані результати на основі геодезичних даних порівняні з ваговим методом. **Наукова новизна та практична значущість.** Вперше в Україні визначено об'єм чинного полігону ТПВ. Запропонована методика визначення об'єму з використанням БПЛА. Також вперше змодельована початкова поверхня та структура рельєфу Львівського полігону ТПВ із використанням архівних картографічних матеріалів станом на 1957 р. Практична значущість результатів полягає у запропонованій авторами методиці, яка дає змогу оперативно визначити параметри полігону відповідно до ДБН В.2.4-2-2005.

Ключові слова: полігон твердих побутових відходів; об'єм, безпілотний літальний апарат; цифрова модель рельєфу, TIN-модель, GRID-модель.

Вступ

Найбільш практикованим способом знешкодження та утилізації полігонів твердих побутових відходів (ТПВ) є їх захоронення на звалищах та полігонах ТПВ. В Україні за 2014 рік утворилось близько 45 млн м³ побутових відходів, які захоронюються на 6 тис. сміттєзвалищ і полігонів загальною площею понад 9 тис. га. Полігони ТПВ повинні забезпечувати санітарне та епідемічне благополуччя населення, еколо-

гічну безпеку навколишнього природного середовища, запобігати розвитку небезпечних геологічних процесів і явищ [Правила з технічної експлуатації полігонів твердих побутових відходів, 2007]. Згідно з [ДБН В.2.4-2-2005] для полігону ТПВ передбачено систему моніторингу, що містить контроль стану підземних і поверхневих водних об'єктів, атмосферного повітря, ґрунтів і рослин, шумового навантаження у зоні можливого негативного впливу

полігону ТПВ. Також під час розрахунку площі ділянки складування ТПВ враховують такі чинники, а саме: термін експлуатації полігону, середня чисельність населення, що обслуговується, середня висота складування ТПВ. Важливим залишається той факт, що кількість відходів та населення постійно зростає, а отже, сам полігон у процесі експлуатації не відповідає санітарно-епідеміологічним та екологічним нормам. Також це стосується і терміну функціонування полігону ТПВ. Більшість полігонів в Україні не відповідають санітарним нормам, винятком не є і Львівський полігон.

Зокрема, для Львівської області паспортизації потребують 96 %, а рекультивацию потрібно провести на – 97 % полігонів від загальної кількості в області [Стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2014 рік, 2016]. Львівський полігон ТПВ зарахований до екологічно небезпечних об'єктів обласного рівня. У наукових джерелах акцентується увага на вкрай незадовільному екологічному стані Львівського полігону ТПВ [Мальований, 2011, Гайдін, 2013, Голець, 2013]. У звіті ВАТ “Геотехнічний інститут” автори зазначають, що термін експлуатації полігону перевищив проектні показники у два рази [Волошин, 2005]. Працівниками ВАТ “Гірхімпром” та відділенням гірничо-хімічної сировини Академії наук України в праці [Зозуля, 2005] розроблена концепція рекультивации Львівського полігону ТПВ, яка враховує вимоги українського законодавства та передбачає послідовні етапи (пошук нових ділянок для сучасного об'єкта поводження з ТВП, впровадження роздільного збору ТПВ, рециклінг вторинної сировини, розробка проекту терміналу для безпечного зберігання та відвантаження гудронів, рекультивация звалища з забезпеченням стійкості та екологічної безпеки, включаючи дегазацію та озеленення), які повинні виконуватися впродовж 10 років. Стан структури утворення і накопичення відходів та заходи щодо покращення ситуації висвітлені у [Двуліт, 2009].

У розвинених країнах існують тенденції, спрямовані на запобігання утворенню відходів, збільшення їх повторного використання, рециклінг і енергетичне використання. Одним з основних джерел викидів від полігонів ТПВ в

навколишнє середовище є біогаз (БГ), неконтрольована емісія якого призводить до негативних екологічних наслідків: збільшується пожежо- та вибухонебезпечність, токсичність навколишнього повітря, розвивається парниковий ефект. Біогаз – поновлюване джерело енергії, у світі реалізовано понад 2000 проектів його використання, найчастіше БГ застосовується для виробництва електроенергії. Вироблення електроенергії із БГ доцільне для великих полігонів, які обслуговують понад 100–200 тис. мешканців [Матвеев, 2013]. Зокрема, для Львівського полігону ТПВ в [Петрушка, 2009] розрахований ефект газоутворення та досліджений процес утворення біогазу і склад твердих побутових відходів.

З аналізу публікацій [Мальований, 2011, Гайдін, 2013, Волошин, 2005, Голець, 2013] стає зрозуміло, що для ефективного планування, проектування та управління елементами Львівського полігону ТПВ необхідно розробити комплекс заходів, що включатиме використання сучасного геодезичного обладнання. Такий комплекс заходів повинен передбачати оперативну побудову різночасових цифрових моделей місцевості, яка є необхідна для візуалізації поверхні полігону ТПВ та аналізу його стану.

Використання таких геометричних параметрів, як площа та висота складування ТПВ, є визначальним фактором під час його управління. В [Tserng, 2002] запропонована методологія і алгоритм розроблення графічної 3D-моделі сміттєзвалища з використанням GPS-приймачів, антен, розроблено програмне забезпечення для управління простором полігону. Моніторинг зміни об'ємів полігонів з використанням радіолокаторів із синтезом апертури (РСА) інтерферометричних зображень на два різні періоди зустрічається у [Karathanassi, 2004]. Використання даних дистанційного зондування у період з 1972 по 2000 рр. для моніторингу та зміни тих чи інших районів полігону Al-Qurain, який розташований у Кувейті, наведено у [Kwarteng, 2004].

Поряд з геодезичними методами дослідження певних геометричних характеристик полігонів також можливе і геофізичними методами. Можливість застосування двох неактивних наземних методів геофізичного моніто-

рингу, а саме: наземного проникаючого радара та відбивної спектроскопії, висвітлено у [Fertier, 2009]. Варто зазначити, що створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР) полігону є надзвичайно важливим аспектом, який можна використовувати як в геологічних цілях, так і для дослідження рухів сміття. Зокрема, у [Coduto, 1990] автори в результаті виконання проекту на полігоні пробурили свердловини та встановили у них спеціальні датчики, які дали можливість на різних глибинах контролювати вертикальні та горизонтальні рухи. Після двох років моніторингу дані свідчать про те, що вертикальні швидкості деформації не залежать від глибини, а горизонтальні рухи на схилах є найбільшими поблизу поверхні і зменшуються з глибиною.

Важливими чинниками під час вибору методу отримання геопросторових даних для визначення об'ємів є собівартість, оперативність та безпечність з точки зору охорони праці і техніки безпеки. Ці характеристики сьогодні має лише технологія БПЛА (безпілотних літальних апаратів), яка набуває ширшого використання порівняно з контактними методами [Лозинський, 2015]. Також з кожним роком знижується собівартість конструювання БПЛА та збільшується кількість програмних продуктів для опрацювання даних, отриманих за допомогою БПЛА. Функціональні можливості таких програмних продуктів та веб-сервісів, як ARC3D, AgiSoft Photo Scan, Bundler, Microsoft Photosynth, Patchbased Multi-view Stereo Software Version 2, описано в [Ansari, 2012]. Основним їх призначенням є автоматичне генерування хмари точок з отриманих зображень.

Усе частіше БПЛА почали використовувати у будівництві [Siebert, 2014], для моніторингу парків [Dustin, 2015], виявлення незаконних зливачів каналізації та інших відходів в інфрачервоному діапазоні [Lega, 2012], моделювання археологічних пам'яток [Naala, 2014], завдань в сільському господарстві та в геодезії і картографії [Schwarzbach, 2009] тощо.

Досвід виконання аерофотознімання з БПЛА для полігонів ТПВ, виконаного в Італії, наведено в [Gasperini, 2014]. У результаті автори отримали ЦМР та ортофотоплан з точністю 2,8 см у плані та 0,5 м – по висоті. ЦМР була

порівняна з моделями, створеними за допомогою теодолітного та лідарного знімання. Стверджується, що використання БПЛА є більш гнучким та продуктивним, ніж два інші методи з аналогічною точністю. Порівняння технології БПЛА з класичним GPS-вимірюванням для моніторингу полігонів ТПВ висвітлено у [Mudura, 2014]. Опрацювання зображень виконувалося у програмному продукті Agisoft PhotoScan, внаслідок чого створено ортофотоплан та 3D-модель місцевості, що дає змогу визначити площі та об'єми полігону. Визначення об'єму полігону ТПВ за допомогою нерегулярної триангуляційної моделі (TIN) та даних регулярної сітки висот (GRID) та порівняння п'яти різних методів інтерполяції проведено словенськими науковцями [Urbančič, 2015]. Для експериментів були обрані три ділянки з приблизними об'ємами від 10000 до 50000 м³. Варто зауважити, що автори вибрали для експерименту доволі невеликі об'єкти, а третя ділянка – взагалі котлован правильної форми, що спрощує задачу обрахунків. В [Lee, 2014] запропонований метод обчислення об'єму відходів, використовуючи хмару точок, отриману з використанням стереовимірювань зображень. Цей метод може бути використаний як для безперервного моніторингу, так і для оцінки корисного терміну функціонування полігону. Створення ЦМР, визначення об'єму та моніторинг зміни об'ємів сміттєзвалища з використанням БПЛА масою до 5 кг бачимо в [Maug, 2015]. Також у цій роботі запропонована технологія та багато прикладів, що описують з високою деталізацією існуючі об'єкти, які можуть використовуватись для планування, візуалізації, документування і передачі геопросторових даних.

Методика розрахунку об'ємів складів готової продукції булощебеневої сировини наведена у [Ващук, 2012]. Визначення об'єму виконувалося у програмі AutoCAD Civil 3D 2012 способом вертикальних паралельних перерізів, розбиття насипу на правильні геометричні фігури, об'ємної палетки П. К. Соболевського. Авторі доходять висновку, що найближчими значеннями до еталонного є спосіб розбиття на найпростіші геометричні фігури та спосіб вертикальних паралельних перерізів із від-

станню між перерізами 5 м з відхиленням значень об'ємів відповідно 0,481 та 0,622 %. Варто зазначити, що запропонована автором методика випробовувалася на доволі малих складах порядку 5000 м³. У роботі [Bellezza, 2004] запропоновано використання симплекс-методу лінійного програмування у проектуванні та визначенні терміну функціонування полігонів. Автори отримали аналітичні вирази, які необхідні для складання комп'ютерних програм, та дають можливість визначати об'єм полігонів відходів.

Враховуючи значний вплив полігону на навколишнє середовище та здоров'я населення, геодезичний моніторинг параметрів полігону, таких як площа, висота складування та об'єм, повинні бути невід'ємною частиною його функціонування, що дасть можливість планувати, проектувати та управляти елементами полігону. Виконавши огляд літературних джерел, можемо зробити висновок, що сьогодні ще не розроблено методики визначення об'ємів з використанням архівних картографічних матеріалів та сучасних БПЛА. Велика кількість закордонних публікацій підтверджує, що моніторинг та визначення об'ємів полігонів ТПВ є надзвичайно актуальним завданням.

Мета

З аналізу наукових публікацій, архівних картографічних матеріалів встановлено, що Львівський полігон ТПВ має певні особливості, які повинні враховуватися під час розроблення методики визначення об'єму. А саме: початковий рельєф з сильною розчленованістю та перепадом висот більше як 70 м унеможлиблює задавання початкової горизонтальної площини під час визначення об'єму. Що стосується сучасної поверхні смітєвого тіла, то її ухили змінюються в межах від 0 до 85°, а перепад висот становить більше як 80 м. Це призводить до значних похибок за рельєф під час виконання аерофотознімання.

Основною метою роботи є розроблення методики визначення об'єму Львівського полігону ТПВ із використанням архівних картографічних матеріалів та даних аерофотознімання станом на жовтень 2015 року з урахуванням особливостей досліджуваного об'єкта.

Для досягнення поставленої мети виконано такі етапи:

- моделювання рельєфу Львівського полігону ТПВ та його структури станом на 1957 р. за архівними картографічними матеріалами;
- аерофотознімання Львівського полігону ТПВ із використанням БПЛА TRIMBLE UX-5 станом на жовтень 2015 р.;
- опрацювання результатів аерофотознімання (створення ортофотоплану та цифрової моделі рельєфу Львівського полігону ТПВ);
- обчислення СКП визначення координат точок з використанням БПЛА;
- визначення об'єму накопичених відходів на Львівському полігоні ТПВ за допомогою регулярних та нерегулярних ЦМР;
- порівняння об'ємів, обчислених на основі ЦМР, отриманих з використанням різних методів інтерполяції;
- розрахунок оцінки точності визначення об'єму Львівського полігону твердих побутових відходів;
- порівняння методів визначення об'єму на основі геодезичних вимірювань та вагового методу.

Методика та результати роботи

Моделювання рельєфу Львівського полігону ТПВ та його структури станом на 1957 р. за архівними картографічними матеріалами

Львівський полігон ТПВ розпочав своє функціонування у 1959 році, знаходиться він на північ від м. Львова, біля с. В. Грибовичі (рис. 1). Полігон ТПВ розташований у межах південно-східного Розточчя, де поширені вододільні горбисті денудаційно-структурні форми рельєфу з абсолютними відмітками 350–360 м і долинно-балкові низини, які лежать на висотах 310–320 м. Полігон закладено у днищі природної балки на рівні абсолютних позначок 274–280 м. У північно-західному напрямку балка розгалужується на два окремі яри, які “врізаються” у східний схил Малехівської гряди [Петрушка, 2009] (рис. 1).

Для моделювання початкової поверхні та структури рельєфу був використаний фрагмент топографічної карти масштабу 1:25000 (переріз рельєфу 5 м, система координат СК-63, система висот Балтійська, проекція Гаусса-Крюгера),

який показано на рис. 2. Особливістю полігону є те, що він був утворений на двох ярах, які з часом заповнювалися відходами. На основі візуальних спостережень ярів, які існують і сьогодні у цій місцевості, встановлено, що вони набувають V-подібної форми (рис. 3). Для високоточного відтворення поверхні і структури рельєфу у місцях значного закладення ізоліній, як і в сідловинах, вершинах, не позначених на карті, бажано задавати додаткові вихідні точки [Бурштинська, 2006], тому для моделювання структури ярів були додані характерні точки, які розташовані на дні яру та мають абсолютну висоту, на десять метрів меншу, ніж відповідні горизонталі на бортах ярів. А також проведено додаткові інтерполяції, як відображено на рис. 4. На основі цієї карти створена цифрова векторна модель ізоліній та ярів станом на 1957 рік. Також ми побудували TIN-модель (рис. 5) станом на 1957 рік, на якій чітко зображено рельєф ярів.



Рис. 1. Львівський полігон ТПВ та озера-гудрони на знімку Google Earth 2016

Fig. 1. Lviv landfill and goudron-lakes on Google Earth 2016

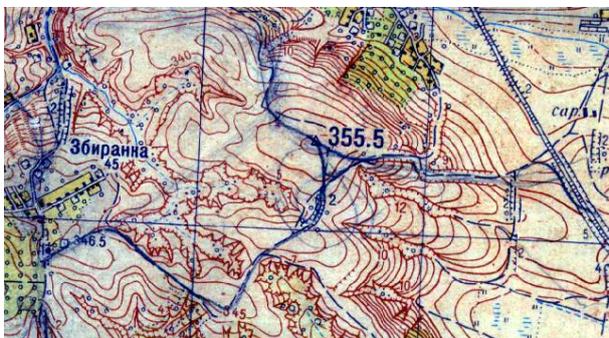


Рис. 2. Фрагмент топографічної карти масштабу 1:25000 з перерізом рельєфу 5 м (1957 р.)

Fig. 2. A fragment of topographic maps of 1: 25000 with a contour interval 5 m (1957 p.)

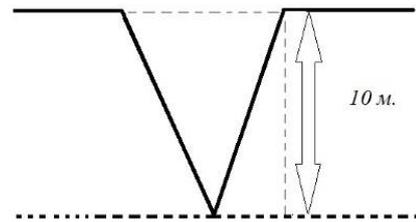


Рис. 3. Схема V-подібної форми ярів
Fig. 3. Pattern V-shaped form gullies

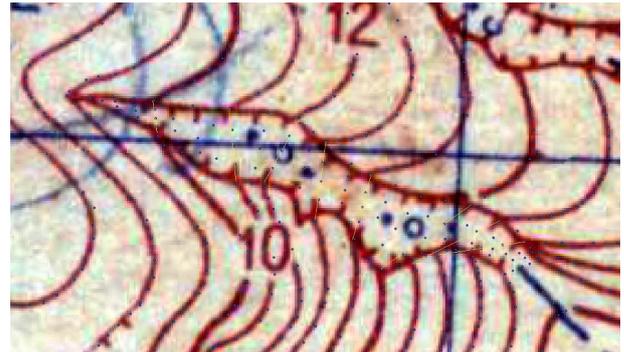


Рис. 4. Моделювання рельєфу яру (лініями з'єднано горизонталі з однаковою висотою, а точками позначено додаткові інтерполяції та ізолінії)

Fig. 4. Modelling gullies (Horizontal lines connected at the same height as the points indicated additional interpolation and contours)

Аерофотознімання Львівського полігону ТПВ із використанням БПЛА TRIMBLE UX-5 станом на жовтень 2015 р.

Для моделювання поверхні Львівського полігону ТПВ у жовтні 2015 року працівники Інституту геодезії виконали аерофотознімання БПЛА TRIMBLE UX-5. На першому етапі виконувалося проектування робіт у контролері Tablet, який використовується для управління і контролю усіх процесів, починаючи від планування маршрутів і до аварійної посадки. Використовуючи програмне забезпечення Trimble Access Aerial Imaging, була запроєктована польотна місія, яка складалася з трьох проектів, як це показано на рис. 6. Перевагою цього продукту є те, що оператор вручну задає висоту знімання, поздовжнє та поперечне перекриття. Також програмний продукт дає можливість автоматично розраховувати необхідний час польоту та розмір пікселя. Для зменшення похибки за рельєф ми запланували три проекти на трьох різних висотах (табл. 1), а також проекти між собою мали поперечне перекриття.

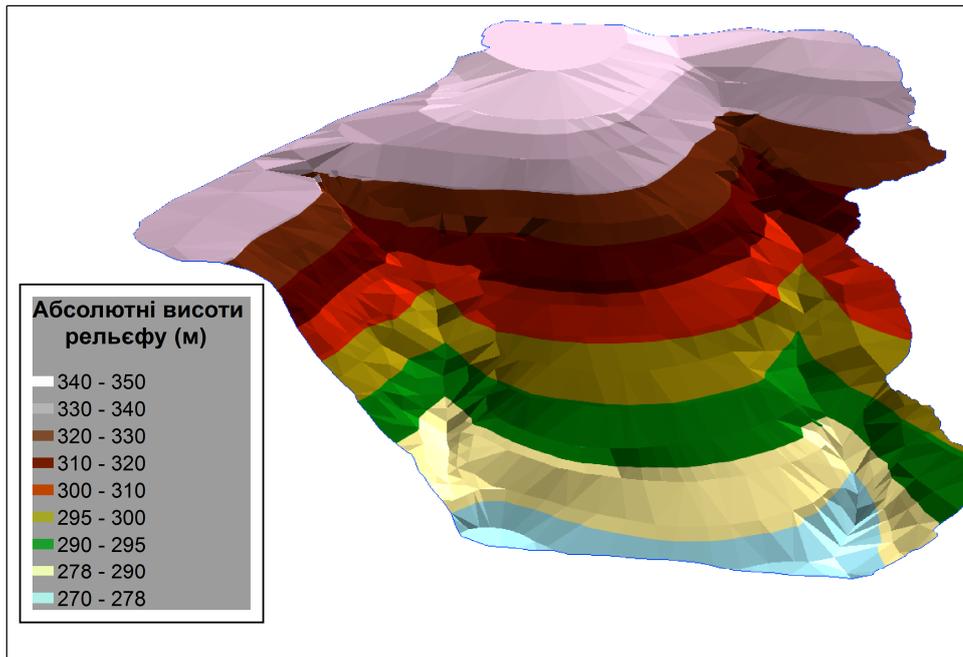


Рис. 5. TIN-модель початкового рельєфу Львівського полігону ТПВ станом на 1957 рік
 Fig. 5. TIN models initial terrain of Lviv landfill as of 1957

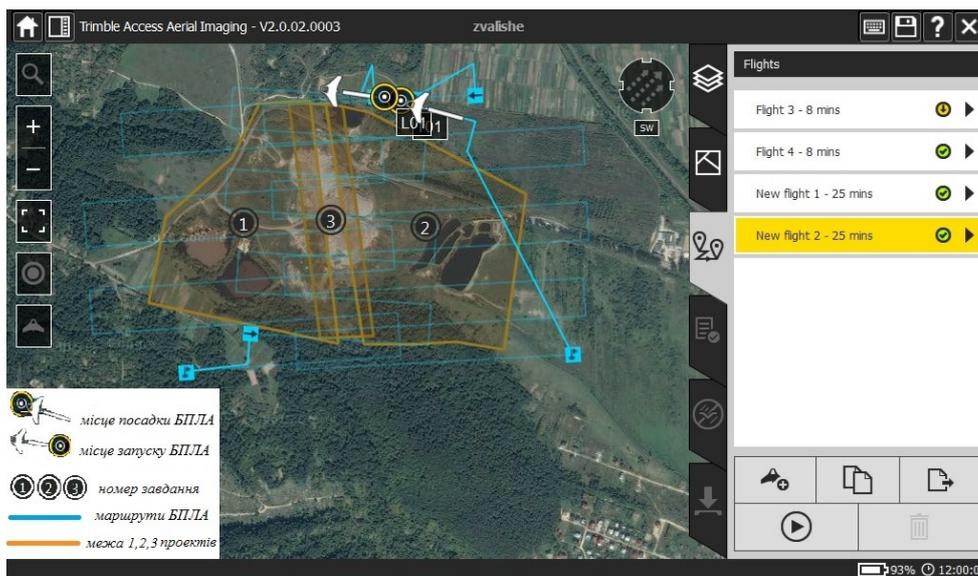


Рис. 6. Вікно програмного пакета Trimble Access Aerial Imaging з нанесеною додатковою інформацією
 Fig. 6. Window software package Trimble Access Aerial Imaging with image additional information

Таблиця 1

Параметри аерофотознімання БПЛА

Table 1

Parameters UAV aerial photographic survey

| № проекту | Поздовжнє 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 |

Під час вибору місця запуску та посадки, які відповідали б технічним характеристикам для цього БПЛА, ми зіткнулися з певними особливостями цього проекту:

- з південної сторони полігон оточений густим лісом, з північної та північно-західної – територія є надзвичайно горбиста та заповнена різними кущами та поодинокими чагарниками, що ускладнювало вибір місця запуску та посадки БПЛА;

- перепад висот між 1 і 2 проектами становить більше як 50 м, що могло вплинути на зв'язок між контролером і літаком;

- на території сміттєзвалища спостерігалось велике скупчення різноманітних птахів, які могли б завадити польоту.

У праці [Вовк, 2015] зазначається, що у період аерознімання з висоти 300 м було відмічено втрачання зв'язку між контролером і літаком, коли він віддалився на 400 м від точки, що призвело до аварійної посадки. Щоб врахувати досвід авторів, ми обрали ділянку, яка знаходиться у північній частині об'єкта, має невеликий ухил. Для цього об'єкта ділянка є оптимальним рішенням, оскільки місце запуску та посадки розташовується поблизу сміттевого тіла (рис. 6) та є захищене з навітряного боку деревами та вкрите високою травою з поодинокими кущами. Цей факт дає можливість безпечного запуску та посадки не тільки проти вітру, а й в іншому напрямку. Також забезпечується найменша відстань до БПЛА і пряма видимість впродовж усього польоту, що дає змо-

гу отримати надійний зв'язок між контролером та літаком. Цей досвід може використовуватись під час подальших досліджень цього та інших об'єктів, які характеризуються складним рельєфом та ситуацією з використанням БПЛА (табл. 1).

Проект планово-висотної прив'язки

Виконання планово-висотної прив'язки є невід'ємною частиною комплексу знімання з БПЛА. Для прив'язки використовувалися опорні точки, як це показано на рис. 7. У процесі координування проводився фотоабрис, який в подальшому був використаний під час створення ортофотоплану для ідентифікації на знімках опорних точок. На усю територію полігону були закоординовані 32 опорні точки, які були розташовані по периметру межі кожного з проектів. Враховуючи характер рельєфу та значний перепад висот на тілі сміттєзвалища, були розташовані додаткові опорні точки, які забезпечили більшу достовірність вихідних даних для фотограмметричного блока. Визначення координат опознаків відбувалося за допомогою ГНСС-приймача Trimble R7 у режимі RTK від мережі базових станцій GEOTERRACE, що належать Національному університету "Львівська політехніка". Точність визначення планових координат становить 3–5 см, висотної компоненти – до 10 см. Для порівняння з існуючими картографічними матеріалами на цю територію, які були виконані у державній системі висот, після завершення знімання усі висоти були приведені до Балтійської системи висот.



Рис. 7. Вигляд опорних точок у різних частинах полігону
Fig. 7. Marking down in some part of the landfill

Опрацювання результатів аерофотознімання (створення ортофотоплану та цифрової моделі рельєфу Львівського полігону ТПВ)

Опрацювання результатів аерофотознімання з БПЛА виконувалося у програмному продукті Trimble Business Center Photogrammetry (рис. 8), який дає доволі великі можливості для створення хмари точок, ортофотоплану, нерегулярної трикутної сітки (TIN), карти ізоліній [Trimble Business Center Office Software]. Для цього виконані такі кроки: завантаження фотографій, вибір системи координат, об'єднання

трьох проектів з різними висотами знімання в один, виконання зовнішнього орієнтування знімків, врівноваження станцій фотографування, у результаті чого створені ортофотоплан (рис. 9), хмара точок (рис. 10) та TIN-модель (рис. 11). Стосовно точності ортофотоплану, то [Вовк, 2015] для цієї моделі БПЛА розраховане апріорне значення середньоквадратичної похибки для висот фотографування 150, 200, 300 м. Ці значення відповідають точності складання топографічних планів у масштабах 1:500, 1:1000 та 1:2000.

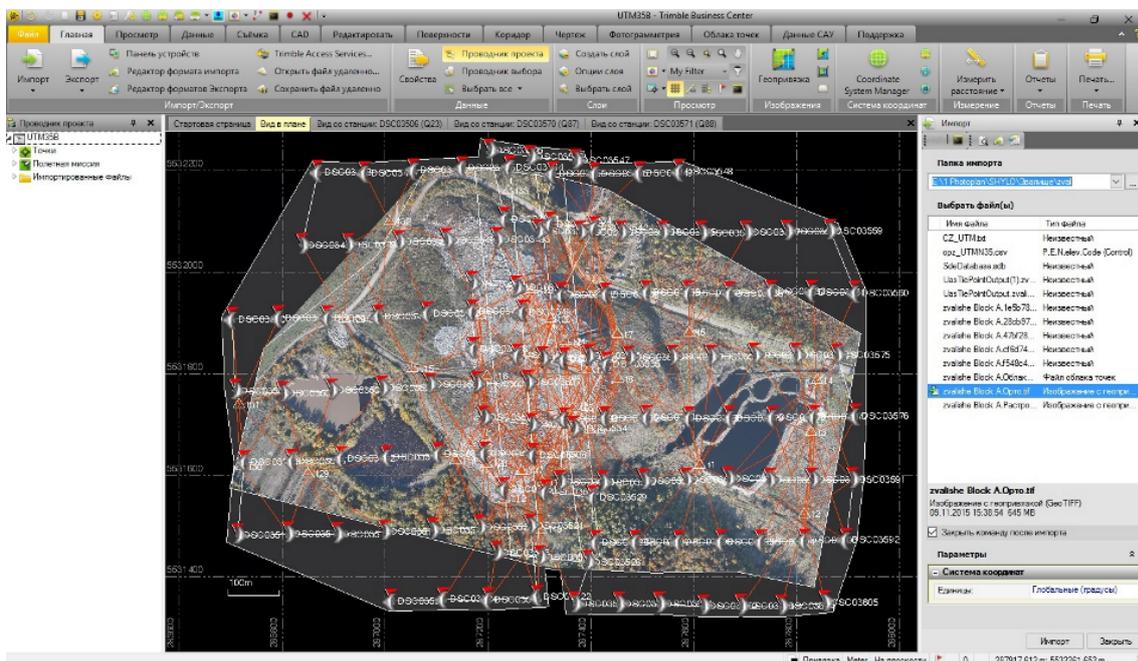


Рис. 8. Вікно Trimble Business Center Photogrammetry з розташованими станціями фотографування
 Fig. 8. Window Trimble Business Center Photogrammetry with station of photographed

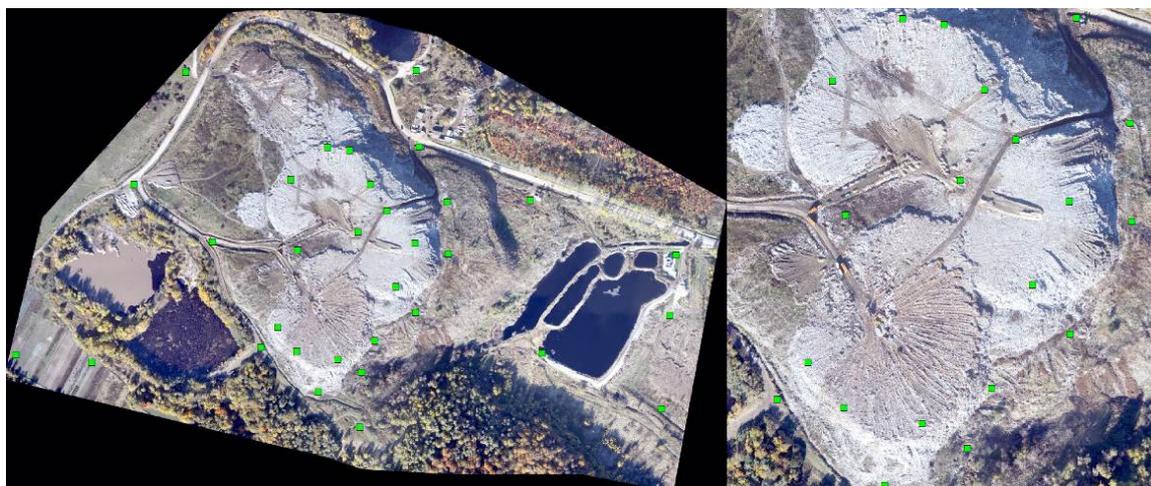


Рис. 9. Ортофотоплан з розташуванням опорних точок
 Fig. 9. Orthophotoplan with a marking drown



Рис. 10. Хмара точок з накладанням ортофотоплану полігону
Fig. 10. Cloud points with imposition of orthophotoplans of landfill

Варто зазначити, що Львівський полігон ТПВ є діючим, тому на його території постійно знаходяться сміттєвози, бульдозери, трактори та автомобілі. Також недіюча частина полігону заросла кущами, висота яких сягає 2 м. Поверхні цих об'єктів були включені до хмари точок. Тому перед побудовою ЦМР необхідно було провести видалення об'єктів, які не належать до класу рельєф.

Обчислення СКП-визначення координат точок з використанням БПЛА

За формулами, поданими у [Лобанов, 1984], ми розрахували середньоквадратичні похибки (СКП) для трьох проектів, які були виконані на різних висотах.

У результаті були обраховані СКП для 260, 280, 300 м висот фотографування, які наведені у табл. 2.

Найрозповсюдженішими моделями подання даних про рельєф у геоінформаційних системах (ГІС) є TIN- та GRID-моделі.

Використавши TIN-моделі, показані на рис. 5 та 11 в ArcGIS з використанням інструменту Surface Difference, обчислено об'єм сміттєвого тіла, який становить 4072357 м³.

Визначення об'єму накопичених відходів на Львівському полігоні ТПВ за допомогою регулярних та нерегулярних ЦМР

Для контролю висоти складування відходів на полігоні створено ізопахіти висоти складання сміття (рис. 12) на якій бачимо, що висота сміття у південній частині сягає більше 50 м (рис. 13).

Таблиця 2

Апріорне значення СКП

Table 2

Prior RMS value

| № проекту | Висота знімання, м | B, м | m_{zn} | m_x | m_y | m_z |
|-----------|--------------------|------|----------|-------|-------|-------|
| 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 |

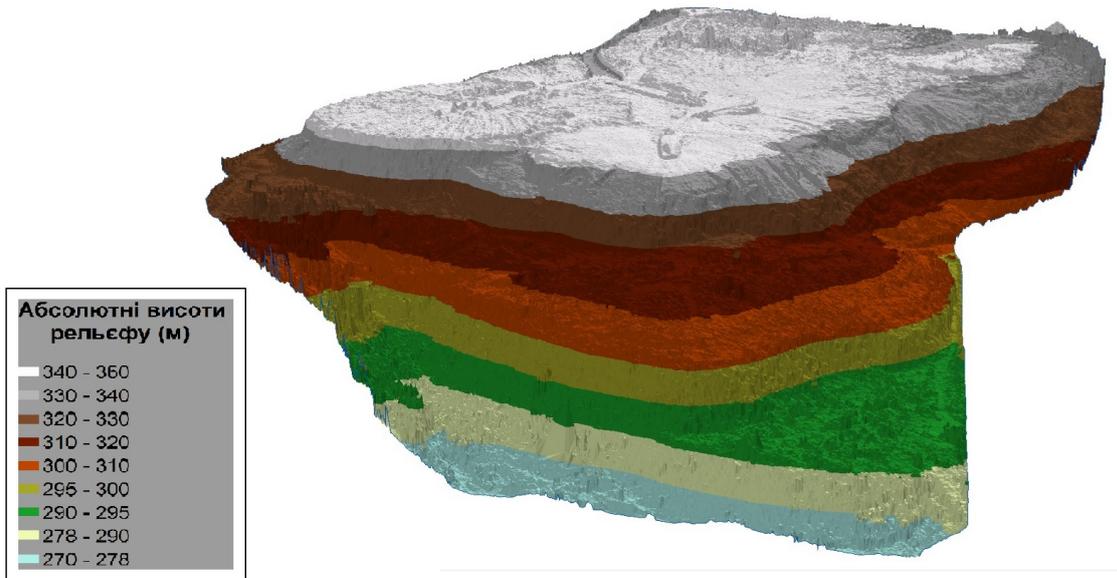


Рис. 11. TIN-модель, отримана з БПЛА станом на 2015 р.

Fig. 11. TIN models obtained from the UAV as of 2015

**ІЗОПАХІТИ ВІДХОДІВ
Львівського полігону ТПВ
відносно початкового рельєфу
(жовтень 2015 року)**

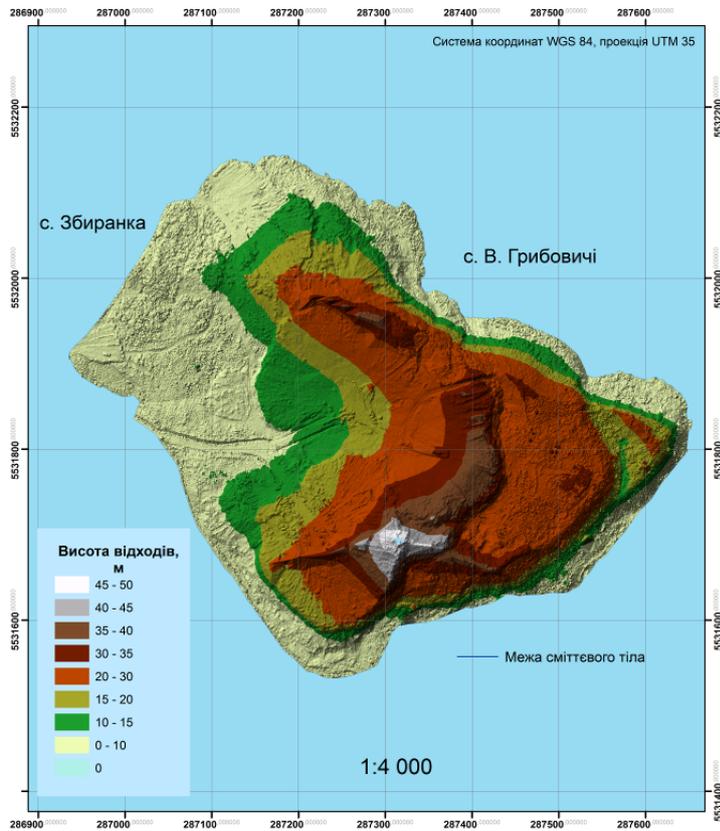


Рис. 12. Ізопакіти відходів Львівського полігону ТПВ станом на 2015 р.

Fig. 12. Isopachytes waste L'viv landfills as of 2015

Порівняння об'ємів, обчислених на основі ЦМР, отриманих з використанням різних методів інтерполяції

Недоліком моделі GRID є те, що вона не завжди може точно відображати структуру рельєфу. Особливо це стосується території, де одночасно присутні ділянки з пологим рельєфом та обриви, які мають великі перепади висот. Подібних недоліків позбавлена модель TIN. Оскільки використовується нерегулярна мережа трикутників, то плоскі ділянки моделюються малою кількістю великих трикутників, а на ділянках крутих уступів поверхня зображається численними маленькими трикутниками [Хромых, 2007]. Основним методом розрахунку TIN є триангуляція Делоне, тому що порівняно з іншими методами вона має властивості, які найбільше підходять для ЦМР [Мусин, 1999]. Перевагою GRID є її регулярність. Цей факт дає змогу використовувати значно простіші математичні алгоритми та скорочувати час обчислень під час роботи з двома поверхнями і більше порівняно з TIN-моделлями.

Враховуючи публікації [Kraus, 2000; Mueller et al., 2001] та результати, наведені в [Urbančić, 2015] під час визначення об'ємів, GRID-модель вважається рівноцінною TIN-моделі, якщо виконується умова (1). Нерівність (1) також використовується під час розрахунку оптимального розміру комірки GRID-моделі:

$$|V_{TIN} - V_{GRID}| < 0,05 \times V_{TIN}, \quad (1)$$

де V_{TIN} – об'єм, визначений за TIN-моделлю;
 V_{GRID} – об'єм, визначений за GRID-моделлю.

Для досліджуваного об'єкта побудовано регулярну ЦМР з квадратною елементарною коміркою та визначено об'єм тіла, обмеженого двома поверхнями, з використанням методу чисельного інтегрування Сімпсона [Press et al, 1988]. Отже, об'єми були визначені для 10-ти розмірів комірки (0.05, 0.1, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 2, 5, 10 м, 20 м) та п'яти методів інтерполяції, а саме:

- Inverse Distance to a Power (IDP): Power = 2, Anisotropy (Ratio) = 1, Number of sectors to search = 4;
- Kriging: Variogram Model = linear, Slope = 1, Anisotropy = 1;

- Triangulation with Linear Interpolation (TLI): Anisotropy (Ratio) = 1;
- Nearest Neighbor (NN): Range 1, 2 = 944;
- Radial Basic Function (RBF): Multi-quadric, $R^2 = 0.069$, Anisotropy = 1.

Для обчислення відносної похибки визначення об'єму за GRID-моделлями використано формулу

$$f = |V_{TIN} - V_{GRID}| / V_{TIN} \cdot 100 \%. \quad (2)$$

Результат обчислень для різних розмірів комірки та методів інтерполяції показаний на графіку рис. 13.

З цього рисунка бачимо, що тільки метод TLI задовольняє нерівність (2). Це можна пояснити тим, що для побудови GRID використовується триангуляція Делоне, оскільки і при побудові TIN-моделі значення у кожній комірці обчислюється за допомогою лінійної інтерполяції для кожного з трикутників. Найбільше відхилення об'єму отримано з використанням методу інтерполяції IDP (12 %). Методи Kriging, NN та RBF дають відхилення у межах 8–9 %. Як бачимо, жоден з методів інтерполяції не дає змоги побудувати GRID, яка була б рівноцінна TIN-моделі, за винятком TLI. За зміни розмірів комірки від 5 см до 20 м відносна похибка f для кожного методу інтерполяції змінюється у межах від 0,5 до 1,14 % (IDP – 0.53 % (бл. 25000 м³), Kriging-0.51 % (бл. 29000 м³), NN – 0.23 % (бл. 14000 м³), RBF – 1.14 % (бл. 42000 м³)). Така незначна зміна об'єму для різних розмірів комірки вказує на складну структуру рельєфу полігону ТПВ, який виражений трьома терасами (рис. 10) з перепадами висот до 80 м, ухилами від 0 до 90°, що ускладнює його описання математичними функціями. Тому в подальшому необхідно виконати низку теоретичних та експериментальних досліджень, пов'язаних з моделюванням поверхонь, отриманих за допомогою БПЛА, та оцінку їх точності на основі даних тахеометричного знімання (пропонується використати роботизований тахеометр у режимі сканування, який дає змогу отримати результати, що є на порядок точнішими) з метою визначення найкращого способу представлення поверхонь з різною конфігурацією (ухил, експозиція, опуклість).

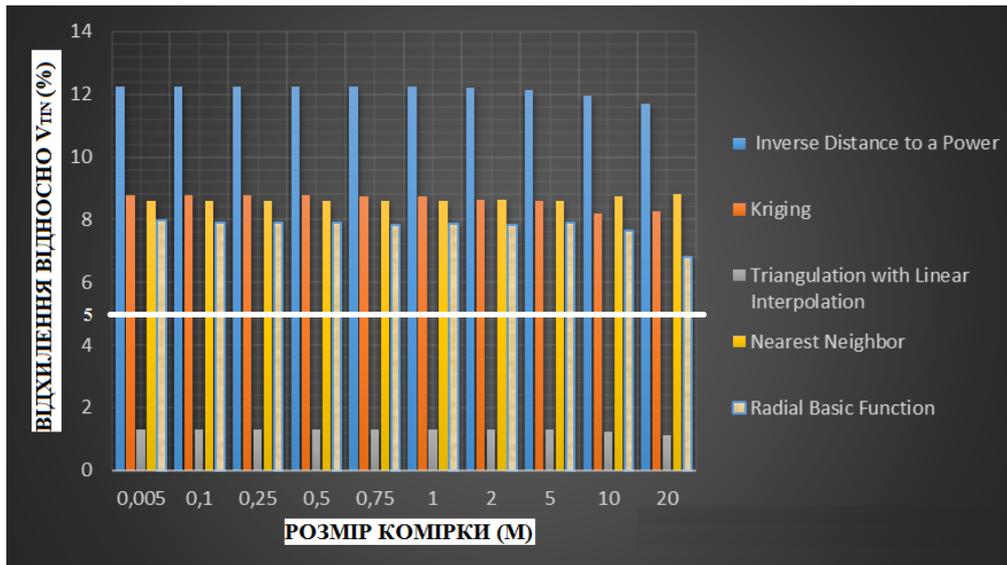


Рис. 13. Відносна похибка об'єму визначена за GRID (%)
 Fig. 13. Relative error of volume determined by GRID (%)

Щорічне накопичення відходів на Львівському полігоні ТПВ упродовж 1959–2015 рр.

Таблиця 3

Table 3

The annual accumulation of waste at L'viv landfill during the 1959–2015

| № | Рік | Вага (тис. т) | Щільність відходів (кг) | Об'єм (м ³) |
|----|-----------|---------------|-------------------------|-------------------------|
| 1 | 1959–1998 | 7621,6 | 230 | 33137391,304 |
| 2 | 1999 | 208,0 | 230 | 904347,826 |
| 3 | 2000 | 198,5 | 230 | 863043,478 |
| 4 | 2001 | 186,8 | 230 | 812173,913 |
| 5 | 2002 | 210,7 | 230 | 916086,957 |
| 6 | 2003 | 222,6 | 230 | 967826,087 |
| 7 | 2004 | 246,7 | 230 | 1072608,696 |
| 8 | 2005 | 260,4 | 230 | 1132173,913 |
| 9 | 2006 | 299,4 | 230 | 1301739,130 |
| 10 | 2007 | 328,2 | 165 | 1989090,909 |
| 11 | 2008 | 335,7 | 165 | 2034545,455 |
| 12 | 2009 | 225,8 | 165 | 1368484,848 |
| 13 | 2010 | 224,1 | 165 | 1358181,818 |
| 14 | 2011 | 223,7 | 165 | 1355757,576 |
| 15 | 2012 | 238,7 | 165 | 1446666,667 |
| 16 | 2013 | 246,3 | 165 | 1492727,273 |
| 17 | 2014 | 235,7 | 165 | 1428484,848 |
| 18 | 2015 | 197,4 | 165 | 1196363,636 |
| 19 | 1959–2015 | | | $\Sigma = 54777694$ |

Що стосується інструмента Surface Difference, то він буде TIN-моделі, які містять точки обидвох поверхонь. Визначення об'єму виконується додаванням елементарних об'ємів трикутних призм з непаралельними основами. Авторське право на математичний алгоритм визначення об'єму однієї призми належить

компанії ESRI і не розголошується. Цей факт унеможливорює виконати апіорну оцінку точності визначеного об'єму з використанням цього інструменту.

У зв'язку з цим для оцінювання точності визначеного об'єму були використані такі умови:

- як початкова поверхня використана карта масштабу 1:25000 з січенням рельєфу 5 м, тому точність визначення висоти становить 1,66 м (1/3 січення);

- точність визначення висот точок з використанням БПЛА становить 0,25–0,33 м залежно від висоти знімання (табл. 2).

Використавши ці умови, розраховано точність визначення об'єму Львівського полігону ТПВ, яка становить 407218 м³, або 10 %.

Обслуговуванням Львівського полігону ТПВ займається ЛКП “Збиранка”, яке використовує ваговий метод визначення об'єму відходів, що, своєю чергою, має найменшу точність. Згідно з даними, отриманими від Львівської міської ради (табл. 3) для того, щоб перейти від ваги до об'єму використовується такий параметр, як щільність відходів. У період з 1959 по 1994 рр. цей коефіцієнт був невідомий і вважатимемо, що він є такий самий, як для 1995–2006 рр. і становить 1 м³ – 230,00 кг. У 2007 році цей коефіцієнт був змінений і дорівнює 1 м³ – 165,00 кг.

Порівнявши отримані результати з даними Львівської міської ради, встановлено, що метод на основі зважування у десятки разів менш точніший, ніж використання такого сучасного геодезичного обладнання, як БПЛА TRIMBLE UX-5. А використання методу на основі зважування – це неспіврозмірні результати порівняно з геодезичними. Також таку розбіжність результатів можна пояснити тим, що на полігоні працює різний транспорт (сміттєвози, бульдозери, трактори), тобто відбувається процес пресування відходів, який призводить до збільшення їх густини. Важливим фактором є сезонні зміни складу ТПВ, що характеризуються збільшенням харчових відходів з 20–25 % навесні та 40–55 % – восени. Варто зазначити, що під час виконання усього комплексу робіт на полігоні відбувається сортування відходів і в подальшому частина відходів вивозиться і може бути використана як вторинна сировина.

На основі вагового методу та визначеного об'єму станом на жовтень 2015 р. визначено густини відходів, що становлять 2875 кг/м³, що є близькими до густини таких речовин, як цемент, мрамур, алюміній.

Наукова новизна і практична значущість

Вперше в Україні визначено об'єм чинного полігону ТПВ. Запропоновано методику визначення об'єму з використанням БПЛА. Також вперше змодельовано початкову поверхню та структуру рельєфу Львівського полігону ТПВ за архівними картографічними матеріалами станом на 1957 р. Практична значущість результатів полягає у запропонованій методиці, яка дає змогу оперативно визначати параметри полігону (ДБН В.2.4-2-2005). Отримані результати можуть бути використані спеціалістами житлово-комунального господарства, екологічної інспекції та науково-дослідних організацій, фахівцями управління охорони довкілля під час розроблення рекомендацій та заходів, що уможливають зменшити негативний вплив полігону на довкілля. Також отримані моделі можуть використовуватися під час проектування елементів полігону для ефективного управління, рекультивациі та енергетичного використання полігону ТПВ. Розроблена методика дасть можливість оперативно побудувати ЦМР у майбутньому, досліджувати динаміку сміттевого тіла та визначати швидкості приросту сміття на Львівському полігоні ТПВ.

Висновки

На основі теоретичних напрацювань, експериментальних досліджень та побудованих ЦМР Львівського полігону ТПВ сформульовані такі висновки та результати:

1. Проаналізовано світовий досвід використання та управління полігонами ТПВ, визначено основні орієнтири та завдання, які допоможуть досягти постійного розвитку у використанні та управлінні такими об'єктами.

2. На основі аналізу вітчизняних та зарубіжних наукових джерел встановлено, що для розроблення рекомендацій і заходів, які дають змогу зменшити негативний вплив на довкілля, а також для ефективного планування, проектування та управління елементами Львівського полігону ТПВ необхідно розробити комплекс заходів, що включатиме використання сучасного геодезичного обладнання.

3. Запропоновано методику для оперативного дистанційного моніторингу об'єктів, які є небезпечними з точки зору охорони праці і техніки безпеки та дає змогу скоротити час виконання робіт. Цю методику апробовано на Львівському полігоні ТПВ з використанням БПЛА TRIMBLE UX-5. В результаті отримано ортофотоплан та ЦМР досліджуваного об'єкта станом місцевості на жовтень 2015 року. Дано рекомендації щодо виконання аерофотознімання з використанням БПЛА для Львівського полігону ТПВ.

4. У роботі змодельована початкова поверхня полігону ТПВ з використанням архівних картографічних матеріалів, що відображають стан місцевості на 1957 р., яка включає структуру двох ярів.

5. На основі різночасових ЦМР та ортофотоплану визначено кількісні параметри Львівського полігону ТПВ, а саме: об'єм та площу, який становить 4072357 м^3 та $0,27 \text{ км}^2$, відповідно. Також створено ізопахіти висоти складання відходів щодо початкової поверхні станом на жовтень 2015 року, згідно з якою висота складування відходів змінюється від 0 до 50 м.

6. Розраховано оцінку точності визначення об'єму полігону ТПВ, яка становить 10 %. Порівнявши дані геодезичного та вагового методу, встановлено, що використання останнього не доцільно під час визначення об'єму, а запропонована методика визначення об'єму з використанням архівних картографічних матеріалів та БПЛА забезпечує точність, вищу на порядок.

7. Проведено апріорну оцінку точності визначення координат за допомогою БПЛА TRIMBLE UX-5 для різних висот знімання (260, 280, 300 м), яка змінюється в межах від 0,20–0,26, 0,15–0,19 та 0,25–0,33 м для координат x , y , z , відповідно.

8. Експериментально встановлено, що визначення об'єму за допомогою GRID-сітки не забезпечує достатньої точності. Одержано відносну похибку об'єму, визначеного за GRID-моделлю, яка для методів інтерполяції IDP, Kriging, NN, RBF змінюється від 8 до 12 %, а для методу Triangulation with Linear Interpolation становить 1 %. Встановлено, що

об'єми, визначені за GRID з розмірами комірок 5 см та 20 м, відрізняються на 1,14 %, що є показником складної структури рельєфу, який унеможливорює однозначно виконати оцінку точності методу інтерпольованої поверхні та об'єму сміттевого тіла. Для оцінки точності та визначення якнайточнішого методу інтерполяції для складної поверхні Львівського полігону ТПВ необхідно побудувати поверхню полігону з використанням технології, яка є на порядок вища (наприклад, лазерне сканування).

9. Визначено, що використання TIN-моделей рельєфу дає змогу отримати точніше значення об'єму з використанням складних математичних залежностей та значних обчислювальних ресурсів. Встановлено, що компанія ESRI не надає можливості ознайомитись з математичним алгоритмом, який використовується у програмному продукті ArcMap для визначення об'ємів за TIN-моделями, що унеможливорює виконання апріорної оцінки точності. Цей факт зумовлює розробити математичний алгоритм та його оптимальну програмну реалізацію для подальших наукових досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Бурштинська Х. В. Аналіз тривимірної моделі рельєфу, побудованої за різними вихідними даними / Х. В. Бурштинська, І. Супрун // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2004. – № 1. – С. 230–233.
- Вашук О. М. Обґрунтування методики підрахунку об'ємів складів готової продукції булощебеневі сировини / О. М. Вашук, Р. В. Соболевський // Вісник ЖДТУ. – 2012. – № 4 (63). – С. 174–182.
- Вовк А. Аналіз результатів для створення ортофотопланів та цифрових моделей рельєфу з застосуванням БПЛА TRIMBLE UX-5 / А. Вовк, В. Глотов, А. Гуніна, А. Маліцький, К. Третяк, Церклевич А. // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2015. – Вип. 81. – С. 90–103. – Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Geodez_2015_81_11.
- Волошин П. К. Про дослідження з оцінки екологічного та санітарно-гігієнічного стану територій, прилеглих до Львівського полігону твердих побутових відходів / П. К. Волошин, Р. О. Цегелик, С. В. Бірук // Звіт ВАТ “Геотехнічний інститут”. – Львів, 2005.

- Гайдін М. Хімічний склад фільтрату Львівського полігону твердих побутових відходів / М. Гайдін, В.О. Дяків, В. Д. Погребенник, А. В. Пашук // *Природа Західного Полісся та прилегліх територій* : зб. наук. пр. / Волин. нац. ун-т ім. Лесі Українки ; [ред. кол.: Ф. В. Зузук та ін.]. – Луцьк, 2013. – № 10. – С. 43–50
- Голець Н. Ю. Розрахунок класу небезпеки фільтрату Грибовицького полігону твердих побутових відходів / Н. Ю. Голець, М. С. Мальований, Ю. О. Малик // *Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності*. – 2013. – № 7. – С. 219–224.
- ДБН В.2.4-2-2005 Полігони твердих побутових відходів. Основні положення проектування.
- Двуліт З. П. Аналіз стану в сфері поводження з відходами в Львівській області / З. П. Двуліт // *Теоретичні та прикладні питання економіки*. – 2009. – С. 269–277.
- Зозуля І. І. Шляхи вирішення проблем Львівського полігону твердих побутових відходів / І. І. Зозуля, А. М. Гайдін, В. О. Дяків // *Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист*. – 2010. – Вип. 1. – С. 106–112.
- Лозинський В. А. Аналіз сучасних методів отримання даних для визначення об'ємів відходів та донних відкладів / В. А. Лозинський // *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*. – 2015. – Вип. II (30). – С. 87–97.
- Мальований М. С. Тверді побутові відходи м. Львова та їх вплив на довкілля / М. С. Мальований, О. Я. Голодовська, М. І. Пастернак // *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. – 2011. – № 700: Хімія, технологія речовин та їх застосування. – С. 250–252.
- Матвеев Ю. Б. Полигоны бытовых отходов: ситуация и перспективы / Ю. Б. Матвеев, А. Ю. Пухнюк // *Твердые бытовые отходы*. – М., 2013. – № 6.
- Мусин О. Р. Диаграмма Вороного и триангуляция Делоне: Заседание Санкт-Петербургского математического общества / О. Р. Мусин. – М.: 1999. – 10 с.
- Наказ Міністерства будівництва, архітектури та ЖКГ України від 05.04.07 № 121. “Правила з технічної експлуатації полігонів твердих побутових відходів”.
- Петрушка І. М. Біогазовий потенціал Львівського полігону твердих побутових відходів / І. М. Петрушка, О. Р. Попович, Г. О. Жук // *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. – 2009. – № 644: Хімія, технологія речовин та їх застосування. – С. 185–188.
- Стан сфери поводження з побутовими відходами в Україні за 2014 рік, 2016 [Електронний ресурс]. – Режим доступу <http://www.minregion.gov.ua/napryamki-diyalnosti/zkhk/terretory/stan-sferi-povodzhennya-z-pobutovimi-vidhodami-v-ukrayini-za-2014-rik>.
- Хромых В. В. Цифровые модели рельефа / В. В. Хромых, О. В. Хромых. – Т.: ТМЛ – Пресс, 2007. – 178 с.
- Ansari A. Use of point cloud with a low-cost UAV system for 3D mapping / A. Ansari // *International Conference on Emerging Trends in Electrical Engineering and Energy Management (ICETEEEM) 2012*. – 2012. – Pp. 131 – 134.
- Bellezza I. Optimisation of landfill volume by the simplex method / I. Bellezza // *Engineering Computations*. – 2014. – Volume 21, Iss: 1. – Pp. 53–65.
- Coduto D. Monitoring Landfill Movements Using Precise Instruments / D. Coduto, R. Huitric // [Електронний ресурс]. – Режим доступу http://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/STP/PAGES/STP25317S.htm
- Dustin M. Monitoring parks with inexpensive UAVs: cost benefits analysis for monitoring and maintaining parks facilities / M. Dustin // *A Thesis Presented to the FACULTY OF THE USC GRADUATE SCHOOL UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree MASTER OF SCIENCE (GEOGRAPHIC INFORMATION SCIENCE AND TECHNOLOGY)*. – Pp. 1 – 113.
- Ferrier G. Application of geophysical monitoring techniques as aids to probabilistic risk-based management of landfill sites / G. Ferrier, L. Frostick, T. Splajt // *The Geographical Journal Special Issue: Reconciling Policy, Practice and Theorisations of Waste Management*. – 2009. – Volume 175, Issue 4. Pp. 304 – 314.
- Gasperini D. Potential and limitation of UAV for monitoring subsidence in municipal landfills / D. Gasperini, P. Allemand, C. Delacourt, P. Grandjean // *International Journal of Environmental Technology and Management*. – 2014. – Volume 17, No.1, pp.1–13.
- Haala N. PERFORMANCE TEST ON UAV-BASED PHOTOGRAMMETRIC DATA COLLECTION / N. Haala, M. Cramer, F. Weimer, M. Trittler // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-1/C22. – 2011. – Pp. 1–6.
- Karathanassi V. Monitoring the Change in Volume of Waste in Landfill Using SAR Interferometry / V. Karathanassi, C. Chousiafis, Z. Grammatikou // *32 EARSeL Symposium 2012 Advances in Geosciences*. – 2012. – Pp. 540–551.

- Kraus K. Zur Genauigkeit der Volumenbestimmung./ K. Kraus // Zeitschrift fuer Vermessungswesen. – 2000. – 125(12). – Pp. 398–402.
- Kwarteng A. Assessment of Kuwait's Al-Qurain Landfill Using Remotely Sensed Data / A. Kwarteng, A. Al-Enezi // Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering. – 2004. – Volume 39, Issue 2. – Pp. 351–364.
- Lee Y. A Study on the Waste Volume Calculation for Efficient Monitoring of the Landfill Facility / Y. Lee, S. Cho, J. Kang // Computer Applications for Database, Education, and Ubiquitous Computing. – 2012. – Volume 352, pp.158 – 169.
- Lega M. Thermal Pattern and Thermal Tracking: fingerprints of an environmental illicit / M. Lega, C. Ferrara, J. Kosmatka, G. Persechino, R. M. A. Napoli // 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. – 2012. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу <http://www.ndt.net/article/qirt2012/papers/QIRT-2012-326.pdf>.
- Mayr W. 3D-Geospatial Data using Unmanned Airborne Vehicles / W. Mayr // Waste-to-Resources 2015. – 2015. – Pp. 548–556.
- Mudura R. Calculate the volume of landfill cristești, mures using the classical method and digital terrain model using picture from UAV / R. Mudura, A. Trif, B. Nedelcu, C. Bara // 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2014. – 2014. – Volume 2, – Pp. 113–120.
- Mueller G. Handbuch Ingenieurgeodaesie / G. Mueller, M. Moeser, H. Schlemer, H. Werner // – 2001.– Strassenbau, 2., voellig neu bearbeitete und erweiterte Auflage Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag, str. 247–249.
- Press W.H. Numerical Recipes in Cambridge / W. H. Press, B. P. Flannery, S. A., Teukolsky, W. T. Vetterling // Cambridge University Press, 1988.
- Schwarzbach M. Acquisition of High Quality Remote Sensing Data Using a UAV Controlled by an Open Source Autopilot / M. Schwarzbach, U. Putze, U. Kirchgaessner, M. v. Schoenermark // International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. – 2009. – Volume 3. – Pp. 595–601.
- Siebert S. Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system / S. Siebert, J. Teizer // Automation in Construction. – 2014. – 41, – Pp. 1–14.
- Trimble Business Center Office Software [Електронний ресурс]. – Режим доступу <http://uas.trimble.com/tbc-am>.
- Tserng H. P. A 3-D Graphical Database System for Landfill Operations Using GPS / H. P. Tserng, J. S. Russell // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. – 2002. – Volume 17, Issue 5. – Pp. 330–341.
- Urbančič T. Vpliv velikosti mrežne celice in metod interpolacij na izračunano prostornino / T. Urbančič, V. Grahor, B. Koler // GEODETSKI VESTNIK. – Volume 59, no. 2. – Pp. 231–245.

В. А. ЛОЗИНСКИЙ¹, В. И. НИКУЛИШИН², К. Р. ТРЕТЯК³, Е. А. ШИЛО⁴

^{1,2} Кафедра картографії і геопространственного моделювання, Національний університет “Львівська політехніка”, ул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013, тел. 098-71-31-398, ел. пошта: viktor.lozynskyi@gmail.com

³ Кафедра вищої геодезії і астрономії, Національний університет “Львівська політехніка”, ул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013.

⁴ Кафедра інженерної геодезії, Національний університет “Львівська політехніка”, ул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМА ЛЬВОВСКОГО ПОЛИГОНА ТБО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АРХИВНЫХ КАРТОГРАФИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ И БПЛА TRIMBLE UX-5

Цель. Львовский полигон твердых бытовых отходов имеет определенные особенности, которые должны учитываться при разработке методики определения объема. А именно, начальный рельеф с сильной расчлененностью и перепадом высот более 70 м исключает задания начальной горизонтальной плоскости при определении объема. Что касается современной поверхности мусорного тела, то ее уклоны изменяются в пределах от 0 до 85°, а перепад высот составляет более 80 м. Это приводит к значительным погрешностям за рельеф при выполнении аэрофотосъемки. Основной целью работы является разработка методики определения объема Львовского полигона твердых бытовых отходов по архивным картографическим материалам и данным аэрофотосъемки состоянием на октябрь 2015 года с учетом особенностей исследуемого объекта. **Методика и результаты.** Несмотря на развитие современных технологий и цифровой картографии, бумажные карты остаются в дальнейшем источником получения информации, которая может служить в

дальнейшем для решения ряда научных задач. Получение данных для определения объемов полигонов твердых бытовых отходов возможно с помощью дистанционных и контактных методов. Среди дистанционных методов все большее применение получают беспилотные летательные аппараты. В соответствии с поставленной целью мы воссоздали первоначальный рельеф полигона ТБО по состоянию на 1957 год. Выполнены аэрофотосъемки Львовского полигона ТБО по состоянию на октябрь 2015 года с применением БПЛА TRIMBLE UX-5. Определены объем и площадь полигона. Экспериментально установлено, что определение объемов следует выполнять по TIN-моделям. А использование GRID-моделей с шагом от 5 см до 20 м. В достаточной мере точно не дает возможности определить объем Львовского полигона ТБО. **Научная новизна и практическая значимость.** Впервые в Украине определен объем действующего полигона ТБО. Предложена методика определения объема с использованием БПЛА. Также впервые смоделирована начальная поверхность и структура рельефа Львовского полигона ТБО по архивным картографическим материалам состоянием на 1957 г. Практическая значимость заключается в предложенной авторами методике, которая позволяет оперативно определять параметры полигона в соответствии с ДБН В.2.4-2-2005.

Ключевые слова: полигон твердых бытовых отходов; объем, беспилотный летательный аппарат; цифровая модель рельефа, TIN-модель, GRID-модель.

V. A. LOZYNSKYI ¹, V. I. NIKULISHYN ², K.R. TRETYAK ³, E.O. SHYLO ⁴

^{1, 2} Department of Cartography and Geospatial Modelling, Lviv Polytechnic National University, S. Bandera str., 12, Lviv, Ukraine, 79013, tel. 098-71-31-398, e-mail: viktor.lozynskyi@gmail.com, ,

³ Department of Higher Geodesy and Astronomy, Lviv Polytechnic National University, S. Bandera str., 12, Lviv, Ukraine, 79013

⁴ Department Engineering Geodesy, Lviv Polytechnic National university, S. Bandera str., 12, Lviv, Ukraine, 79013

METHOD FOR DETERMINING THE VOLUME LVIV SOLID WASTE LANDFILL BY USING ARCHIVAL MAPPING MATERIALS AND UAV TRIMBLE UX-5

Purpose. Lviv landfill has some features that should be considered when developing the methodology for determining the volume. The initial relief of severe fragmentation and a height difference of more than 70 meters make it is impossible to set the original horizontal plane for determining the volume. The slope of current garbage body surface ranges from 0 to 85 degrees and a vertical drop is more than 80 m. This leads to significant relief errors in carry out for aerialphotography. The main purpose is development of methodology for determining the volume of Lviv landfill using archival cartographic materials and data of aerialphotography in October 2015 taking into account the features of the object. **Methodology and results.** Despite the development of modern technologies and digital cartography paper maps are source of information that can be used to solve a number of scientific problems. Obtaining data for determining the volume of landfill is possible through the use of remote and contact methods. The most popular among remote methods are UAV. According to our purpose, we have reproduced the original relief of landfill in 1957. Conducted aerialphotography of Lviv landfill in October 2015 using UAVs TRIMBLE UX-5. Determined volume and area of the Lviv landfill. Experimentally establish that the volume should be determined by TIN models. Because the use of GRID models in increments of 5 cm to 20 m does not enable to accurately determine the volume of Lviv landfill. Conducted accuracy estimation of the volume of Lviv landfill. The results based on geodetic data were compared with weight method data. **Scientific novelty and practical significance.** The first in Ukraine was determined the volume of existing landfills. Proposed new methodology of determining the volume using UAVs. Also conducted modeling of the initial surface and relief structure of Lviv landfill using archival cartographic materials in 1957. The practical significance of obtained results is the proposed by the author's methodology that allows operatively determine the parameters of the landfill in accordance with DBN V.2.4-2-2005.

Key words: landfill; volume; UAV; digital surface model; TIN model; GRID model.

REFERENCES

- Burshtyns'ka Kh. V., Suprun I. *Analysis of three-dimensional terrain models, based on different input data* Proceedings of the Western Society surveying UTHK "Modern achievements of geodetic science and industry". 2004, no 1, pp. 230–233.
- Vashchuk O. M., Sobolevs'kyi R. V. *Justification the methodology for calculating the volume of warehouses ready product concrete raw material* Bulletin ZSTU. 2012, no 4 (63), pp. 174–182.

- Vovk A., Hlotov V., Hunina A., Malits'kyi A., Tretyak K., Tserklevych A. *Analysis of the results for the creation of orthophotos and digital elevation models using UAVs TRIMBLE UX-5* Geodesy, Cartography and Aerial Photography. 2015, Vol. 81, pp. 90–103.
- Voloshyn P. K., Tsehelyk R. O., Biruk S. V. *On research on the environmental and sanitary condition adjacent to the Lviv 'landfill* Report of "Geotechnical Institute". Lviv, 2005.
- Haydin M., Dyakiv V. O., Pohrebennyk V. D., Pashuk A. V. *The chemical composition of the filtrate Lviv landfill* Nature of the West Polesie and the surrounding areas: Coll. Science. paper. Volyn national university Lesia Ukrayinka ; [Editorial Board: F. V. Zuzuk et al]. Lutsk, 2013, no. 10, pp. 43–50
- Holets' N. Yu., Mal'ovanyy M. S., Malyk Yu. O. *Calculation hazard class filtrate Hrybovytskoho landfill* Bulletin of Lviv State University of Life Safety. 2013, no. 7, pp. 219–224.
- DBN V.2.4-2-2005 landfills main provisions of design.
- Dvulit Z. P. *Analysis of the state in the field of waste management in the Lviv region* Theoretical and applied economic issues. 2009, pp. 269–277.
- Zozulya I. I., Haydin A. M., Dyakiv V. O. *Ways of solving the problems of the Lviv landfill* Technogenic and ecological safety and civil protection. 2010, Vol. 1, pp. 106–112.
- Lozynskiy V. A. *Analysis of current methods of obtaining data to determine the volumes of waste and sediments. Modern achievements in geodetic science and industry.* Lviv, 2015, Vol. 2(30), pp. 87–97.
- Mal'ovanyy M. S., Holodovs'ka O. Ya., Pasternak M. I. *Lviv Municipal solid waste and their impact on the environment* Herald of the National University "Lviv Polytechnic". Lviv, 2011, number 700: Chemistry, Technology substances and their use. pp. 250–252.
- Matveev Yu. B., Pukhnyuk A. Yu. *Landfills: situation and prospects* Municipal solid waste. Moscow, 2013, no. 6
- Musyn O. R. *Chart Voronoi and Delaunay triangulation* Moskov: Meeting of St. Peterburh mathematical society, 1999, 10 p.
- Order of the Ministry of Construction, Architecture and Housing and Communal Services of Ukraine of 05.04.07 number 121 "Rules of technical operation of solid waste."
- Petrushka I. M., Popovych O. R., Zhuk H. O. *The biogas potential of Lviv landfill* Herald of the National University "Lviv Polytechnic". – 2009. – № 644: Chemistry, Technology substances and their use. pp. 185–188.
- State the sphere of waste in Ukraine 2014., 2016.
- Khromыkh V. V., O. V. Khromыkh. *Tsyfrovye modely rel'efa* [Digital terrain models], 2007, 178 p.
- Ansari A. *Use of point cloud with a low-cost UAV system for 3D mapping* International Conference on Emerging Trends in Electrical Engineering and Energy Management (ICETEEEM) 2012, pp. 131–134.
- Bellezza I. *Optimisation of landfill volume by the simplex method* Engineering Computations. 2014, Volume 21, Iss: 1, pp. 53–65.
- Coduto D., Huitric R. *Monitoring Landfill Movements Using Precise Instruments* http://www.astm.org/digital_library/stp/pages/STP25317S.htm
- Dustin M. *Monitoring parks with inexpensive UAVs: cost benefits analysis for monitoring and maintaining parks facilities* A Thesis presented to the faculty of the usc graduate school university of SOUTHERN CALIFORNIA In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree master of science (geographic information science and technology), pp. 1–113.
- Ferrier G., Frostick L., Splajt T. *Application of geophysical monitoring techniques as aids to probabilistic risk-based management of landfill sites* The Geographical Journal Special Issue: Reconciling Policy, Practice and Theorisations of Waste Management. 2009, Vol. 175, Issue 4, pp. 304–314.
- Gasperini D., Allemand P., Delacourt C., Grandjean P. *Potential and limitation of UAV for monitoring subsidence in municipal landfills* International Journal of Environmental Technology and Management. 2014, Vol. 17, No. 1, pp. 1–13.
- Haala N., Cramer M., Weimer F., Trittler M. *Performance test on uav-based photogrammetric data collection* International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII-1/C22. 2011, pp. 1 – 6.
- Karathanassi V., Chousiafis C., Grammatikou Z. *Monitoring the Change in Volume of Waste in Landfill Using SAR Interferometry* 32 EARSeL Symposium 2012 Advances in Geosciences. 2012, pp. 540–551.
- Kraus K. *Zur Genauigkeit der Volumenbestimmung* Zeitschrift fuer Vermessungswesen. 2000, 125(12), pp. 398–402.
- Kwarteng A., Al-Enezi A. *Assessment of Kuwait's Al-Qurain Landfill Using Remotely Sensed Data* Journal of Environmental Science and Health, Part A: Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering. 2004, Vol. 39, Issue 2, pp. 351–364.
- Lee Y., Cho S., Kang J. *A Study on the Waste Volume Calculation for Efficient Monitoring of the Landfill Facility* Computer Applications for Database, Education, and Ubiquitous Computing. 2012, Vol. 352, pp. 158–169.

- Lega M., Ferrara C., Kosmatka J., Persechino G., Napoli R.M.A. Thermal Pattern and Thermal Tracking: fingerprints of an environmental illicit 11th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography. 2012, <http://www.ndt.net/article/qirt2012/papers/QIRT-2012-326.pdf>.
- Mayr W. 3D-Geospatial Data using Unmanned Airborne Vehicles Waste-to-Resources. 2015, pp. 548–556.
- Mudura R., Trif A., Nedelcu B., Bara C. Calculate the volume of landfill cristesti, mures using the classical method and digital terrain model using picture from UAV. 14th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2014. Vol. 2, pp. 113–120.
- Mueller G., Moeser, M., Schlemer, H., Werner, H. Handbuch Ingenieurgeodaesie. Strassenbau, 2., voellig neu bearbeitete und erweiterte Auflage Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag, 2001, pp. 247–249.
- Press W. H., Flannery B. P., Teukolsky S. A., Vetterling W. T. Numerical Recipes in Cambridge, Cambridge University Press. 1988.
- Schwarzbach M., Putze U., Kirchgassner U., Schoenermark M. v. Acquisition of High Quality Remote Sensing Data Using a UAV Controlled by an Open Source Autopilot International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. 2009, Vol. 3, pp. 595–601.
- Siebert S., Teizer J. Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system. Automation in Construction. 2014, 41, pp. 1–14.
- Trimble Business Center Office Software <http://uas.trimble.com/tbc-am>
- Tserng H. P., Russell J. S. A 3-D Graphical Database System for Landfill Operations Using GPS Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2002, Vol. 17, Issue 5, pp. 330–341.
- Urbančič T., Grahor V., Koler B. Vpliv velikosti mrežne celice in metod interpolacij na izračunano prostornino GEODETSKI VESTNIK. Vol. 59, no. 2, pp. 231–245.

Надійшла 12.05.2016 р.