

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ ЗЕМЛЕВПОРЯДКУВАННЯ І ТУРИЗМУ
КАФЕДРА ГЕОДЕЗІЇ І ГЕОІНФОРМАТИКИ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Освітнього ступеня «Магістр»

на тему: *“Методика цифрового моделювання рельєфу для оцінки поверхневого стоку на території академічного містечка Львівського національного університету природокористування”*

Виконав: студент 6 курсу, групи ЗВ-61

Спеціальності 193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва)

Мацура Богдан Михайлович

(Прізвище та ініціали)

Керівник: Куліковська О.Є.

(Прізвище та ініціали)

Рецензент: _____

(Прізвище та ініціали)

Дубляни 2024

УДК 528.9

Методика цифрового моделювання рельєфу для оцінки поверхневого стоку на території академічного містечка Львівського національного університету природокористування. Мацура Б. М. Магістерська кваліфікаційна робота. Кафедра геодезії і геоінформатики. – Львівський національний університет природокористування, 2023, – 73 с. текстової частини, 11 таблиць, 31 рисунок, 26 літературних джерел.

Проаналізовано теоретичні основи дослідження поверхневого стоку на основі геоданих локального рівня для міських територій.

Досліджено методику цифрового моделювання місцевості за даними аерознімання з безпілотного літального апарату для потреб гідрологічного моделювання стоку в середовищі геоінформаційних систем.

Створено цифрову модель рельєфу та план підстильної поверхні для виконання геоінформаційного дослідження поверхневого стоку на території Львівського національного університету природокористування. Дано рекомендації для виконання аналогічних робіт на територіях із схожими фізико-географічними характеристиками та умовами антропогенного навантаження.

Розглянуті питання охорони довкілля та охорони праці.

Ключові слова: *поверхневий стік, урбанізовані території, цифрова модель рельєфу, геоінформаційне моделювання стоку.*

ЗМІСТ

	стор.
Вступ.	7
1 ПОВЕРХНЕВИЙ СТІК З МІСЬКОЇ ТЕРИТОРІЇ ТА ГЕОДАНИ ДЛЯ ЙОГО КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ	8
1.1 Явище поверхневого стоку та його особливості на території міст.	8
1.2 Моделі поверхневого стоку в геоінформатиці.	13
1.3. Геодані, необхідні для моделювання поверхневого стоку з міської території.	18
2 ТЕХНОЛОГІЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РЕЛЬЄФУ ТА ПІДСТИЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ МІСТА ДУБЛЯНИ ЛЬВІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ	25
2.1 Територія дослідження. Існуючі цифрові моделі представлення рельєфу земної поверхні на території.	25
2.2 Вдосконалення наземної опорної геодезичної мережі на території ЛНУП для моделювання місцевості за аерознімками з БПЛА.	32
2.3 Технологія цифрового моделювання місцевості за аерознімками з БПЛА.	37
3 ГЕОІНФОРМАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕРХНЕВОГО СТОКУ НА ТЕРИТОРІЇ ЛЬВІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ.	42
3.1 Цифрове моделювання рельєфу на досліджуваній території за матеріалами аерознімання з безпілотного літального апарату.	42
3.2 Створення просторової цифрової моделі водонепроникних поверхонь на території університету.	46
3.3 Оцінка точності цифрової моделі рельєфу.	56
4 ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПЛОТНИКІВ ДЛЯ ОХОРОНИ ДОВКІЛЛЯ.	63

5	СВІТОВИЙ ДОСВІД СТВОРЕННЯ ПРАВОВИХ УМОВ ДЛЯ БЕЗПЕЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ.	66
	ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ.	69
	БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК.	71

ВСТУП

Поверхневий стік - це процес стікання води з водозборів разом з матеріалами, речовинами і теплом що в ній містяться. Дослідження поверхневого стоку є важливою умовою сталого водокористування і ефективного використання земельних ресурсів. Особливо ретельно таке дослідження виконується на території міст, окремих виробничих комплексів, в зонах особливо цінних земель та земель що охороняються як природоохоронні об'єкти та елементи культурної спадщини. Відповідні методики опису умов та розрахунку об'єму поверхневого стоку описано в державних будівельних нормах та галузевих нормативних документах і опираються на визначення водозбірних площ, характеру використання території, існуючу організацію стоку. У сучасних умовах реалізація дослідження поверхневого стоку відбувається на основі матеріалів топографічного знімання території з використанням геоінформаційних технологій. Тому тематика вивчення та вдосконалення методик дослідження поверхневого стоку із застосуванням сучасних технологій збору та опрацювання геоданих є актуальною.

Завданням даної кваліфікаційної роботи є систематизація науково-методологічних засад цифрового моделювання місцевості за даними аерознімання з БПЛА для потреб гідрологічного моделювання стоку в середовищі геоінформаційних систем.

Предметом досліджень є методика забезпечення геоданими, зокрема створення цифрової моделі рельєфу та плану підстильної поверхні для виконання геоінформаційного дослідження поверхневого стоку на території Львівського національного університету природокористування.

Об'єктом досліджень є територія Львівського національного університету природокористування.

1. ПОВЕРХНЕВИЙ СТІК З МІСЬКОЇ ТЕРИТОРІЇ ТА ГЕОДАНІ ДЛЯ ЙОГО КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

1.1 Явище поверхневого стоку та його особливості на території міст

В дослідженні гідрологічного циклу важливу частину складає опис стоку. Стік – це подія, що виникає внаслідок випадання атмосферних опадів, танення снігів, зрошення, миття вулиць і доріг та інших господарських міроприємств. Стік є переміщенням під дією сили тяжіння вільної води по поверхні землі (поверхневий стік), в товщі ґрунту (внутрішньогрунтовий), у товщі земної кори (підземний), у випадку сформованого флювіального рельєфу – в природніх руслах, а в антропогенно перетвореному ландшафті - в мережі водовідведення (дренажний стік). Стікання вільних вод відбувається в межах водозбірного басейну - частини земної поверхні і товщі ґрунтів, з яких відбувається стік води у водотік, водойму і пониження рельєфу та формує їхню водність. Протягом року виділяють фази стоку: повінь, паводки, межень.

При розрахунках визначається величина стоку, тобто кількість води, що стікає з водозбору за встановлений нормативний інтервал часу. Вода стічна – це вода, що утворилася внаслідок випадання атмосферних опадів в процесі господарсько-побутової і виробничої діяльності а також відведена з забудованої території [3].

В цій роботі ми зосереджуємось на дослідженні поверхневого стоку - процесу переміщення вод (здебільшого атмосферного походження) по земній поверхні під дією сили тяжіння. В понятті «поверхневий стік» розрізняють русловий (потік води по русловій мережі водозбору, інколи виділяють тальвеговий і річковий стоки) і схиловий (стікання води по поверхні схилів поза фіксованих русел водотоків до досягнення постійних русел або водозбірника такого як озеро). Русловий стік має визначений, стійкий характер і напрямок течії та відбувається на днищах від'ємних рельєфних нерівностей. Іноді у формуванні руслового поверхневого стоку приймають участь підземні течії і ґрунтові води.

Поверхневий стік виражають через такі показники: витрата води, об'єм стоку, модуль стоку, шар стоку, площа земної поверхні, з якої відбувається стік вод в водотік.

Величина поверхневого стоку залежить від кількості і інтенсивності опадів, площі водозбірного басейну та типу підстильної поверхні. Так, на безлісній площі поверхневий стік становить близько 65% річної суми опадів і часто викликає водну ерозію ґрунтів, а при лісистості 100% поверхневий стік складає тільки 5% [18].

При збільшенні поверхневого стоку на схилах формується ерозійна мережа, якої раніше не було, що призводить до необхідності втручання людини для забезпечення більш ефективного відведення стоку зі схилу [6]. Міроприємства з інженерного облаштування та благоустрою територій завжди повинні скеровуватись на збереження природи і покращення умов проживання населення. Розробка проектів має ґрунтуватись на попередньому вивченні природних умов місцевості. В містобудівній практиці організацію поверхневого стоку розглядають в межах порівняно невеликих водозбірних площ (300, 500, 1000 га), в яких найбільшим є вплив ливневого стоку. На незабудованій території, розміщеній в природних умовах стоку, основними напрямками відводу поверхневого стоку є мережа тальвегів невеликих басейнів і суббасейнів. При забудові і благоустрої міських територій ця природна система водовідводу замінюється організованою системою водовідводу [21].

Іншим негативним наслідком дії поверхневого стоку є формування забруднюючого стоку з неточкового джерела, води якого можуть містити залишки рослин, сміття, продукти руйнації дорожніх покриттів та ерозії ґрунту а також штучні забруднювачі такі як пестициди, гербіциди, інсектициди, органічні і хімічні добрива, нафтопродукти, мийні води тощо. Для поверхневого стоку характерна епізодичність його надходження, мінливість витрати і рівня забруднення.

За законодавством України скид стічних вод в межах міста заборонено і всі стічні води підлягають очищенню, тому поверхневий стік є основним

забруднювачем міських водних об'єктів, з яким надходить до 80 % забруднень. Вміст завислих речовин у поверхневому стоку залежить від типу міської території (табл. 1.1) [9].

Таблиця 1.1 - Вміст завислих речовин у поверхневому стоку з різнотипних територій міста

Тип міської території	Вміст завислих речовин, г/м ³	
	дощовий стік	сніговий стік
Сучасна житлова забудова	1400-1500	2500
Недостатньо упоряджені території з переваженням садибної забудови	1800-2500	2000
Центральні упоряджені райони міста з інтенсивним дорожнім рухом	1700-2200	3000
Житлова забудова з високим рівнем благоустрою і регулярного механізованого прибирання дорожніх покриттів	300-1000	відсутність за рахунок вивозу снігу
Райони, що включають промислові підприємства і житлові квартали	1700-2500	4000
Будівельні майданчики, житлові райони на території, схильної до ерозії	4000-6000	-

При оцінці санітарного стану та ступеню благоустрою території беруться до уваги наявність руйнування дорожніх покриттів, відкритих еродованих ділянок ґрунту, джерел надходження нафтопродуктів, місць періодичного накопичення сміття, неорганізованих звалищ, стану складування та транспортування сипучих та рідких матеріалів та напівфабрикатів, здатних потрапляти в поверхневий стік. [7].

Загальний об'єм поверхневого стоку з водозбірної території за рік визначається як сума об'ємів дощових, снігових і поливомийних вод відповідно. При наявності на площі водозбору парків або лісових масивів значна частина атмосферних опадів утримується рослинним покривом. Об'єм поверхневого стоку, що затримується рослинністю, визначається за даними що наведені у табл. 1.2 з врахуванням переважаючого виду рослинності.

Таблиця 1.2 - Норми затримки атмосферних опадів рослинністю

Вид рослинності	Шар затриманих рослинністю атмосферних опадів H_3 , мм												
	Місяці року												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	за рік
Хвойний ліс	10	10	10	18	19	20	25	22	17	16	12	10	189
Листяний ліс	1	1	1	4	10	11	14	12	8	6	4	2	79

Наближено річний об'єм дощових або снігових вод визначається за формулою:

$$W = 10 \psi F (H - H_3), \text{ м}^3/\text{рік}, \quad (1.1)$$

де ψ – коефіцієнт стоку;

F – водозбірна площа, га;

H – шар опадів, що випав, мм;

H_3 – шар затриманих рослинністю атмосферних опадів, мм.

Частина поверхневого стоку випаровується та фільтрується у ґрунт. Для визначення втрат поверхневого стоку на шляху до постійного русла чи площинного водного об'єкту використовується величина коефіцієнту стоку ψ .

$$\psi = \frac{Q_{i.n.}}{Q_{a.i}}, \quad (1.2)$$

де $Q_{n.c.}$ – об'єм води, що стікає до водного об'єкту з одиниці площі даного виду водозбірної поверхні за одиницю часу;

$Q_{a.o.}$ – об'єм атмосферних опадів, що за одиницю часу потрапляє на одиницю площі.

Значення коефіцієнту стоку для різних типів поверхонь наведені у табл. 1.3.

Таблиця 1.3 - Коефіцієнт стоку для різних типів поверхонь

Тип водозбірної поверхні	Коефіцієнт стоку		
	дощові води	снігові води	поливомийні води
Забудовані території	0,6	0,6	0,6
Незабудовані території	0,3	0,6	-
Парки, гравійні покриття	0,3	0,6	-
Водонепроникні поверхні	0,6-0,8	0,91-0,95	0,6
Ґрунтові поверхні	0,2	0,6	-
Газони, зелені насадження	0,1	0,2	0,6

Усереднене значення коефіцієнта стоку для водозбірної площі розраховується як за формулою:

$$\psi = \sum \alpha_i \psi_i, \quad (1.3)$$

де α_i – частка площі, що має відповідне покриття від загальної площі водозбору;

ψ_i – коефіцієнти стоку для різних видів покриттів.

Для наближених розрахунків об'ємів поверхневого стоку з території невеличких міст або селищ коефіцієнт стоку для дощових вод може прийматися в межах 0,3-0,4, для талих снігових вод 0,5-0,7.

Об'єм стічних дощових або снігових вод за рік розраховується по формулі:

$$W = 10 \psi F H, \text{ м}^3/\text{рік}, \quad (1.4)$$

де ψ – коефіцієнт стоку дощових або снігових вод; F – площа водозбірної території, га; H – прошарок опадів за теплий або холодний період року відповідно, мм.

Об'єм поливомийних вод визначається за формулою:

$$W = 10 t k F_m \psi, \text{ м}^3/\text{рік}, \quad (1.5)$$

де t – витрата води на одиницю площі, л/м²;

k – кількість мийок за рік;

F_m – площа оброблених покриттів, га;

ψ – коефіцієнт стоку поливомийних вод.

Значення параметрів, що входять у цю формулу, визначається у відповідних ДБН і нормативах господарюючих організацій.

Підсумовуючи наведене вище, слід зазначити, що для здійснення розрахунку поверхневого стоку в умовах міської території необхідне якісне забезпечення просторовими даними щодо рельєфу та стану підстильної поверхні. Методику збору геоданих слід обрати, враховуючи що міські території піддаються суттєвому і постійному антропогенному впливу, постійно здійснюються вдосконалення інфраструктури та інженерного обладнання. Це має суттєвий вплив на умови поверхневого стоку. Зведення будівель і споруд, влаштування асфальтобетонних та брукованих покриттів призводить до появи високої частки гідроізолюваних (водонепроникних) поверхонь і збільшує пікове навантаження на систему водовідведення. Крім того, при зборі геоданих слід передбачити можливість отримання інформації про наявність на території і умови прояву забрудників поверхневих стічних вод.

На нашу думку, в означених обставинах надійним джерелом геоданих може стати великомасштабне аерознімання з безпілотного літального апарату (БПЛА).

1.2 Моделі поверхневого стоку в геоінформації

Картування поведінки води в ландшафті є ключовим аспектом розробки підходів щодо сталого землекористування та відповідального управління цінними ресурсами Землі. Ключову роль у геоінформаційній методології відіграють окреслення водозбірної та дренажної мережі з цифрової моделі рельєфу та створення карт напрямку стоку, щільності тальвегів та інших

геоінформаційних продуктів. Програмні засоби ГІС, такі як ArcGIS Pro, QGIS та інші мають розвинутий функціонал для здійснення процедур створення цифрових моделей місцевості та подальшого їх морфометричного і гідрологічного аналізу.

Рельєф — це сукупність нерівностей поверхні суходолу і дна водойм, різноманітних за обрисами, розмірами, походженням, будовою. В моделюванні поверхневого стоку на локальному рівні в цифровій формі описують мезорельєф — форми рельєфу масштабу охоплення річкової долини, ущелини, улоговини, моренні горби, долини малих річок, яри, балки тощо. Їхня площа вимірюється кількома або десятками квадратних кілометрів, а амплітуди висот сягають декількох десятків метрів. Цифрова модель рельєфу (ЦМР, digital terrain model, DTM; digital elevation model, DEM; Digital Terrain Elevation Data, DTED) — цифрове подання рельєфу у вигляді тривимірного покриття у виді набору тривимірних нерегулярно розташованих точок, триангуляційної нерегулярної моделі (TIN-модель), регулярної сітки висот (GRID-модель); сукупністю структурних (орографічних) ліній або горизонталей. Щільність описаних моделей та їхня геометрична точність опису реальної земної поверхні встановлюється у відповідності від типу та призначення моделі. [19]

Геоінформаційні системи використовують для дослідження територій програмні засоби, які працюють з такими наборами даних як ґрунтовий покрив, цифрові моделі висот, каста крутості та орієнтації схилів, карта опадів та карти водонепроникних поверхонь і забудови. На рисунку 1.1 показано короткий перелік геопросторових інструментів, які використовуються в дослідженні територій.

Інструменти геообробки, які використовуються в методології моделювання стоку ГІС такі: растровий калькулятор, інструменти для виявлення та заповнення безстокових ділянок в цифровій моделі рельєфу, визначення та створення карт напрямків потоків і накопичення потужності стоку, виділення на ЦМР басейнів водозборів, розрахунок положення ліній тальвегової орографічної мережі, перетворення растрових даних до векторних поліліній та полігонів.

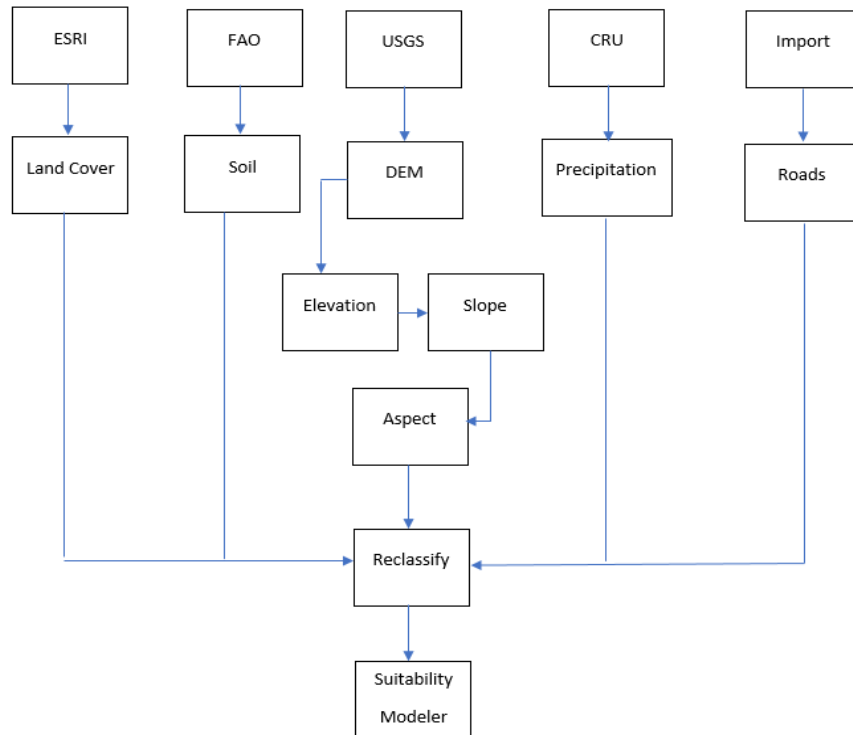


Рис.1.1. Методологічна послідовність дій під час використання ArcGIS

Для водозбору ріки а також для окремого постійного чи тимчасового водотоку визначають:

- а) довжину;
- б) середню ширину;
- в) коефіцієнт витягнутості водозбору;
- г) середню висоту;
- д) крутість схилів;
- е) коефіцієнт асиметрії.

На рисунку 1.2 показано короткий виклад методологічного процесу, використаного в дослідженні для окреслення водозбірної та дренажної мережі з ЦМР, а також для створення карти щільності мережі тальвегів [21].

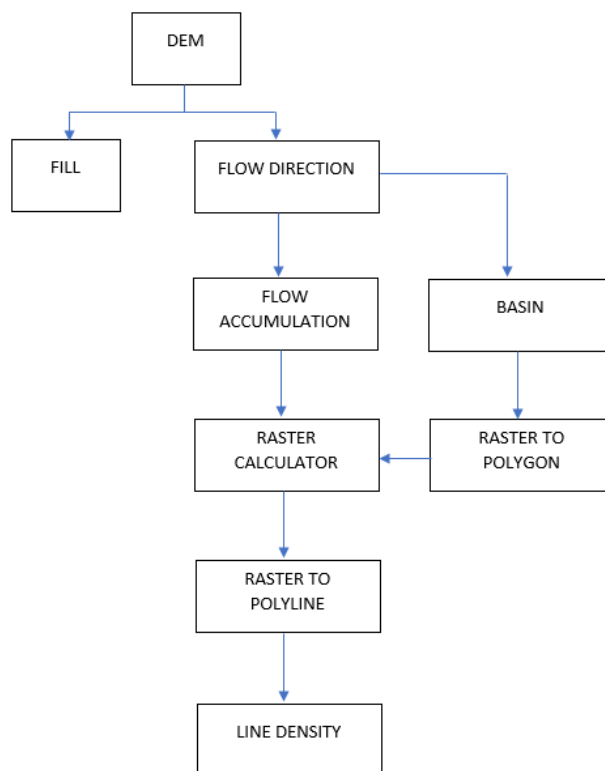


Рис.1.2. Методологічна послідовність дій під час використання ArcGIS для окреслення водозбору та створення карти щільності дренажу

У відповідності до схеми 1.2 ЦМР піддається послідовно процедурам геообробки, які містяться в спеціалізованих програмних модулях Spatial Analyst, 3D Analyst, Hydrologic Modeling:

- Fill - для пошуку та заповнення безстічних областей в моделі ЦМР;
- Flow Direction, Flow Accumulation - на основі скоректованої ЦМР розраховуються азимутальний напрям, довжину стоків і зони акумуляції стоків;
- Basin - за напрямками стоку і зонам акумуляції розраховують растрові та векторні полігони водозбірних басейнів.

На наступному етапі моделі на рис.1.2 визначаються за пороговим значенням кількості елементарних комірок в растровій моделі накопичення стоку визначають мережу тальвегів спочатку у растровому, а потім і у векторному виді. Мережа водовідведення формується для досліджуваної території відповідно до рівня деталізації, заданого при розрахунку в растровому

калькуляторі. Типовою є обрана мінімальна водозбірна площа 100 комірок растрової моделі водозбору, яка дозволяє виявити притоки другого та вищих порядків. Для векторизації дренажної мережі використовується інструмент «Raster to Polyline».

Завершує показаний на рис.1.2 процес побудова карти щільності тальвегової (дренажної) мережі.

При вирішенні ряду екологічних задач в межах розділу проекту землеустрою «Охорона оточуючого середовища» а також таких практичних задач як проектування мереж дощової каналізації та регулювання поверхневого стоку для міських територій, загальноприйнятими рекомендаціями є застосування узагальнених залежностей для розрахунку утворюваного об'єму стоку. В таких розрахункових схемах не враховуються характеристики схилових поверхонь (крутість схилу, експозиції, дійсні тривимірної площі, сегментація ліній тальвегів за величиною ухилів тощо).

Розрахунки ведуть через узагальнений коефіцієнт стоку, який приймають середнім для водозбірного басейну на основі характеру покриття підстильної поверхні і умов техногенного освоєння, але не на основі морфологічних характеристик рельєфу. Цей підхід в останніх дослідженнях модифікується з врахуванням наявності нового, ефективного розрахунково-аналітичного апарату геоінформаційних технологій. При такому підході неможливо визначити шляхи міграції стоку на водозбірному басейні, зони підвищеної його акумуляції [22]. Нові підходи до геоінформаційного моделювання стоку у всіх його проявах дозволяють більш обґрунтовано приймати рішення при здійсненні проектування інженерного облаштування територій, вирішенні екологічних задач та точності прогнозування паводкової ситуації. Нові джерела отримання геоданих, зокрема матеріали аерознімань та космічних знімань дозволяють забезпечити методологію даними щодо ландшафтної структури відповідного басейну. Також актуальним є необхідність врахування в цій методиці прямих і зворотних зв'язків між рельєфом та гідрологічними особливостями [1, 26].

1.3 Геодані, необхідні для моделювання поверхневого стоку з міської території

Як слідує з вище викладеного, основними джерелами даних для моделювання поверхневого стоку є кліматичні дані, топографічні карти та плани, матеріали топографічних та аерокосмічних знімків. На підставі аналізу топографічної інформації визначають характеристики рельєфу територій, моделюють рослинність, ґрунти, забудованість та інженерне облаштування.

Топографічні матеріали є цінним джерелом визначення гідрографічних характеристик місцевості: сукупності морфологічних і морфометричних характеристик водних об'єктів і їхніх водозборів, які дають повне уявлення про характер, форму, розміри, протяжність та про інші фізико-географічні особливості.

В цій задачі визначальну роль відводиться моделі рельєфу, адже від її якості залежить точність визначення морфометричних характеристик схилів, точність моделювання орографічної мережі та інші результати моделювання в ГІС (рис.1.3).

Найбільш ефективними способами цифрового представлення рельєфу є:

- регулярної матриці (регулярна або матрична модель) з поданням значення висоти земної поверхні у вузлах сітки прямокутників або трикутників;
- нерегулярної, так званої TIN-моделі (TIN – Triangulated Irregular Network), що включає деяку сукупність точок з висотними відмітками, за якою виконана тріангуляція з урахуванням лінії розриву поверхні;
- векторних ліній (горизонталей або інших ізоліній з регулярним або нерегулярним кроком).

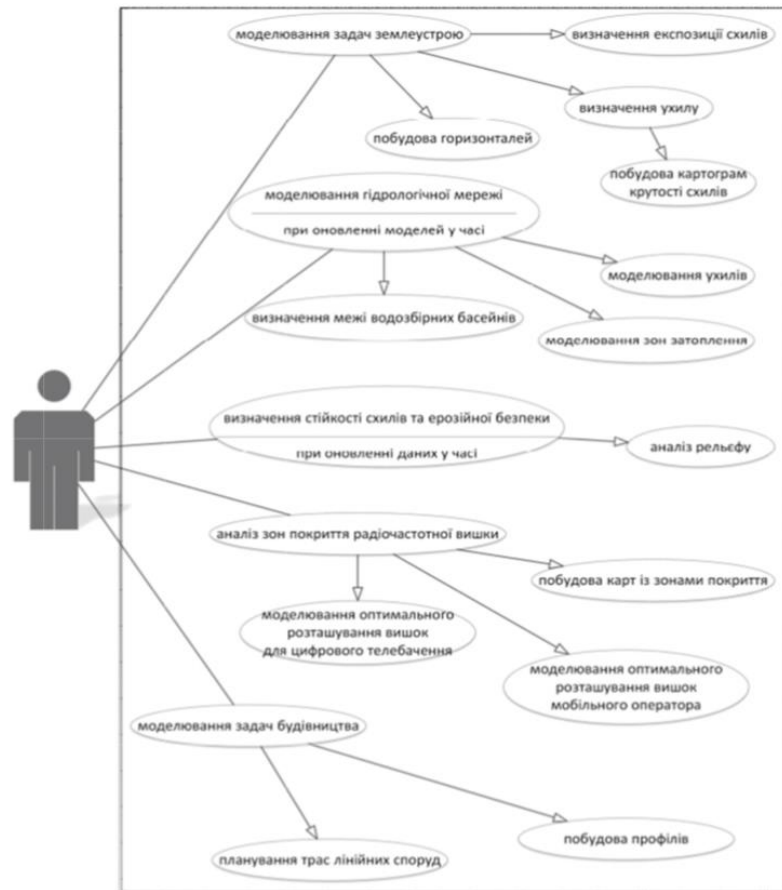


Рис.1. 3. Застосування цифрових моделей рельєфу в ГІС [8]

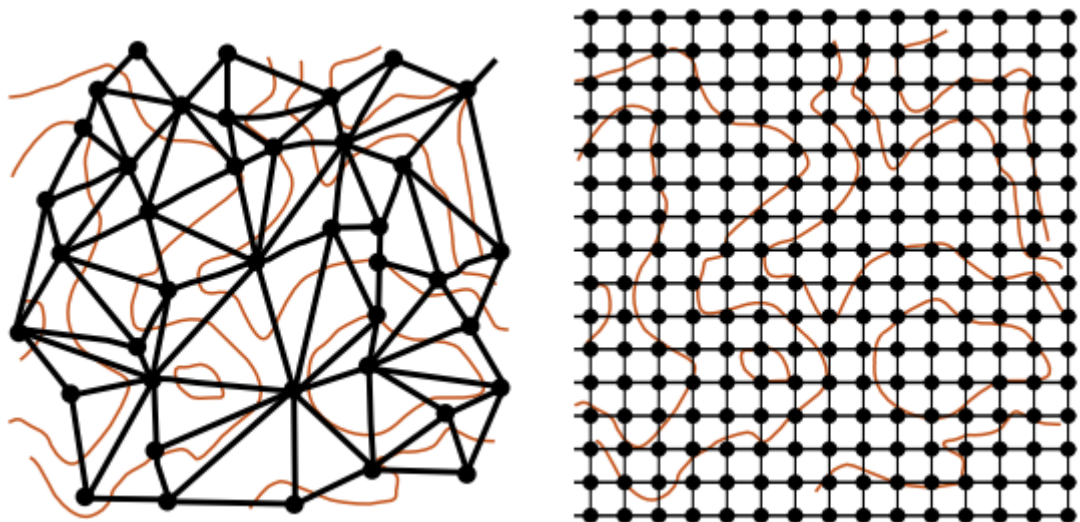


Рис.1. 4. Способи цифрового представлення рельєфу: TIN та регулярна (матрична) модель

ЦМР може бути надана у форматах: GeoTIFF, Arc/Info ASCII Grid (ASC), Band interleaved (BIL), XYZ або у вигляді тайлів у форматі KMZ.

ЦМР у вигляді моделей TIN може надаватись у форматах: Wavefront OBJ, 3DS, VRML, COLLADA, Stanford PLY, STL models, Autodesk FBX, AutoCAD DXF, Google Earth KMZ, U3D Universal 3D, Adobe PDF.

Горизонталі (ізогіпси) надаються у форматах: AutoCAD DXF, ArcGIS SHP, Google KML, текстовий файл.

Моделі рельєфу повинні забезпечити якісний опис кількісних показників водотоків – довжина тальвегу, середній ухил, звивистість, координати повздожнього та поперечного профілів. Щодо водозборів такими характеристиками є: площа, довжина, максимальна ширина, середня висота, середній ухил, довжина вододільної лінії, коефіцієнт асиметрії водозбору, густина руслової мережі, коефіцієнт каналізованості руслової мережі.

При застосуванні топографічних матеріалів для визначення площ водозборів і міжприточного простору, площ лісів, озер, боліт, забудови тощо використовують масштаби карт, представлені в таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 - Масштаби карт, що використовуються для визначення площ водозборів

Характер рельєфу водозбору	Площа водозбору, км ²	Масштаби карт			
		плани і велико-масштабні карти	1:100000	1:200000 1:300000	1:500000 1:1000000
Рівнинні водозбори із слабо вираженим рельєфом	100 100–1000 1000–10000 > 10000	+	+	+	+

Рівнинні водозбори, значно перетнуті річковою і яружно-балковою мережею	20 20 - 200 200 – 10000 >10000	+	+	+	+
Гірські ріки	10 10-100 100-10000 >10000	+	+	+	+

В даний час як джерела даних для створення ЦМР оцифровані топографічні карти і матеріали польових знімачь поступово відходять на другий план, поступаючись більш прогресивним і ефективним методам вилучення даних про рельєф — обробці матеріалів ДЗЗ. Цьому сприяє зростання просторового розрізнення оптико-електронних сканерних знімальних систем, поширення інтерферометричного методу отримання даних про рельєф, засобів лідарного та радарного знімання. Розміщення цих засобів знімання на різних платформах дозволяє отримувати дані різного просторового охоплення та геометричної точності, як показано на рис.1.5.

Одним із найбільш яскравих прикладів використання даних ДЗЗ для побудови ЦМР у глобальному масштабі є обробка зображень, отриманих із супутника Terra, оснащеного мультиспектральним скануючим пристроєм ASTER. ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) — вдосконалений мультиспектральний сканер, встановлений на борту супутника Terra в грудні 1999 р. Складається з трьох розділених між собою інструментальних підсистем, будь-яка з яких виконує знімання у визначеному спектральному діапазоні. За отримання даних, використовуваних для створення ЦМР, відповідає підсистема, що працює у видимому і ближньому інфрачервоному діапазоні спектру електромагнітних хвиль. Вона складається з двох камер, одна з яких веде знімання у видимому діапазоні спектру в надир, а друга — в ближньому інфрачервоному під кутом 27,7° від надира.

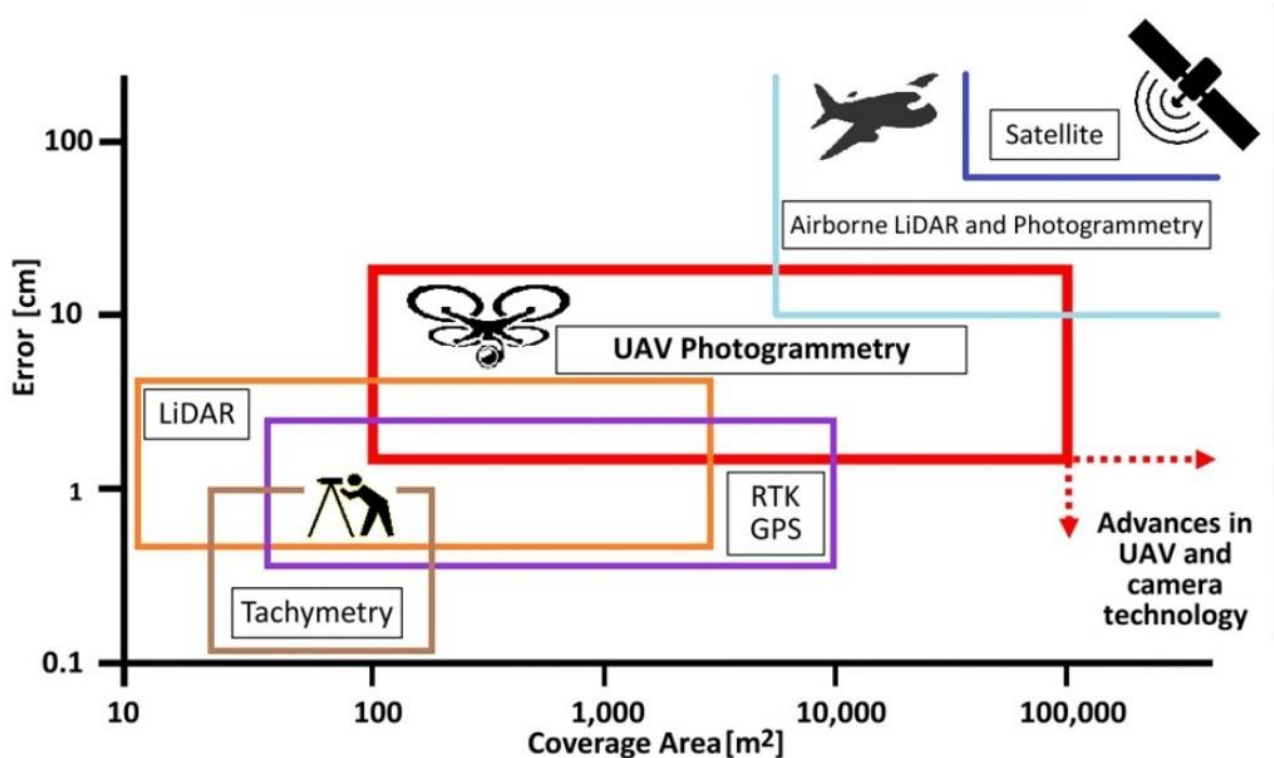


Рис.1.5. Просторове охоплення та геометрична точність різних методів отримання геодезичної інформації

Основними відмінними характеристиками системи ASTER є висота над поверхнею Землі рівна 705 км і можливість подальшої стереоскопічної обробки знімків. Дані, отримані за допомогою сенсора ASTER, знаходяться у вільному доступі в Інтернет і дозволяють користувачам створювати ЦМР з просторовим дозволом і висотною точністю порядку 15 м. Супутникове дистанційне зондування є вирішальним фактором для охоплення великих територій для моніторингу, але супутникові продукти з відкритим кодом мають низьку просторову роздільну здатність, і їх використання для вивчення малих водозбірних басейнів обмежене. Однак супутникові ЦМР отримані фотограмметричним методом надають кращу просторову роздільну здатність із вищою точністю.

Крім фотографічних і сканерних способів отримання даних ДЗЗ, особливу популярність в останні десятиліття отримали активні методи зйомки Землі з авіаційними і з космічними носіями. До їх числа відносяться різні модифікації

лідарної та радіолокаційної зйомки. Успішною реалізацією інтерферометричної радіолокаційної зйомки для отримання даних про рельєф Землі відносно високого просторового простору стала місія SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission). Це проект радіолокаційної інтерферометричної зйомки поверхні землі реалізований у лютому 2000 р. з борта космічного корабля багаторазового використання. Як активний випромінювач використано сенсор SIR-C/X-SAR — радари із синтезованою апертурою, що працює в X-діапазоні (з довжиною хвилі близько 3 см) а також в C-діапазоні (з довжиною хвилі близько 5,6 см). В результаті місії отримано висотні дані про 80% поверхні Землі з просторовим дозволом порядку 30 м. Відповідно до документації проекту, середня квадратична помилка визначення висоти ЦМР з ймовірністю 90% не перевищить 16 м ($LE_{90}=16$ м). SRTM30 доступна для завантаження на веб-порталі Геологічної служби США (<http://earthexplorer.usgs.gov/>).

В роботі [17] було порівняно моделі SRTM та ASTER GDEM на території басейну р. Західний Буг з еталонною ЦМР, отриманою за картою масштабу 1:10 000. Виявлено вищу точність моделі SRTM у порівнянні з ASTER GDEM. Проте регулярні растрові ЦМР з просторовим розрізненням 10x10 м та більшим не дозволяє відображати деталі гідроморфологічних параметрів водозборів і русел, мікрорельєф поверхні, що є особливо важливим для моделювання стоку з плоских рівнин.

Для даних ДЗЗ, створені за стереопарами цифрові моделі можна умовно розділити на 3 типи: високодетальні (крок сітки на місцевості 1-5м), детальні (крок сітки на місцевості 5-10м) і середньодетальні (крок сітки на місцевості 10-20м).

Для локального моделювання рельєфу дедалі частіше застосовують фотограмметричний метод опрацювання аерознімків, отриманих з безпілотних літальних апаратів (БПЛА) [23]. При створенні ЦМР за такими аерознімками в основному застосовують напівавтоматичні і автоматичні методи. Програми комп'ютерного опрацювання застосовують технології машинного зору і цифрової фотограмметрії для знаходження відповідних точок на багатьох

цифрових знімках. Враховуючи дані геоприв'язки центрів проектування аерознімків і кути повороту камери, кожному пікселю відшукується відповідність на інших цифрових знімках. В результаті формується хмара 3D точок. Швидкість опрацювання складає біля 3 секунд на знімок, а результуюча точність визначення координат по висоті досягає 1–2 пікселя при умові достатнього забезпечення проекту наземною опорною мережею (рис.1.6).

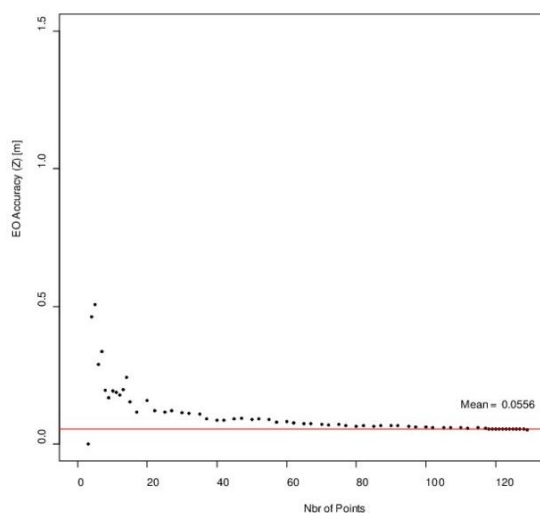


Рис.1. 6. Залежність середніх квадратичних помилок визначення просторових координат точок (RMSE) по відношенню до кількості використаних наземних опорних точок (GCP). Червона лінія представляє середнє очікуване значення [24].

Після побудови щільної хмари точок наступним кроком є створення карти висот. Типовим варіантом налаштувань (наприклад у широко розповсюдженій фотограмметричній комп'ютерній програмі Inpho від компанії Trimble) є можливість створення моделей висот за рівнями піраміди зображень, з послідовним уточненням і збільшенням рівня деталізації. Можливе створення регулярної ЦМР з різним кроком сітки:

- Detailed (Детальна) — сітка з кроком $27 \times \text{GSD}$ по рівню 0;
- Smooth (Гладка) — сітка з кроком $30 \times \text{GSD}$ по рівню 1;
- Smoother (Більш гладка) — сітка з кроком $30 \times \text{GSD}$ по рівню 2.

2. ТЕХНОЛОГІЯ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РЕЛЬЄФУ ТА ПІДСТИЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ МІСТА ДУБЛЯНИ ЛЬВІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

2.1 Територія дослідження. Існуючі цифрові моделі представлення рельєфу земної поверхні на території.

Львівський національний університет природокористування розміщений в м.Дубляни Львівської територіальної громади у Львівській області. Впродовж його історії, яка розпочалася 9 січня 1856 року і дотепер територія університету постійно розширювалась, упорядковувалась. На теперішній час головна частина території університету займає ділянку площею 53,08га. Найдавнішими спорудами, які досі експлуатуються є навчальний корпус (1888 рік) факультету землевпорядкування та туризму та колишній хімічний корпус (1906 рік). Ці будівлі, а також будівлі лікарні, механічної майстерні, кафедри механіки переробки і зберігання сільськогосподарської продукції та інші мають статус пам'яток архітектури.

В 1892 році за ініціативи професора ботаніки Ігнація Шишиловича створено дендропарк чи ботанічний сад та розсадник плодово-ягідних дерев. У 1894 році його розширили. У 60-х роках ХХ століття територію парку було впорядковано, висаджено декоративні та лісоутворюючі породи [14].

Сучасний стан території університету можна оцінити за матеріалами топографічних карт і планів, даних космічними знімань та аерознімками. На рисунку 2.1. представлено модель LULC (Land Use Land Cover). Цей продукт щорічно створює за космічними знімками Sentinel-2 та публікує Європейське космічне агенство та афілійовані організації. На растр LULC нами накладено карту вулиць Open Street Map [25].

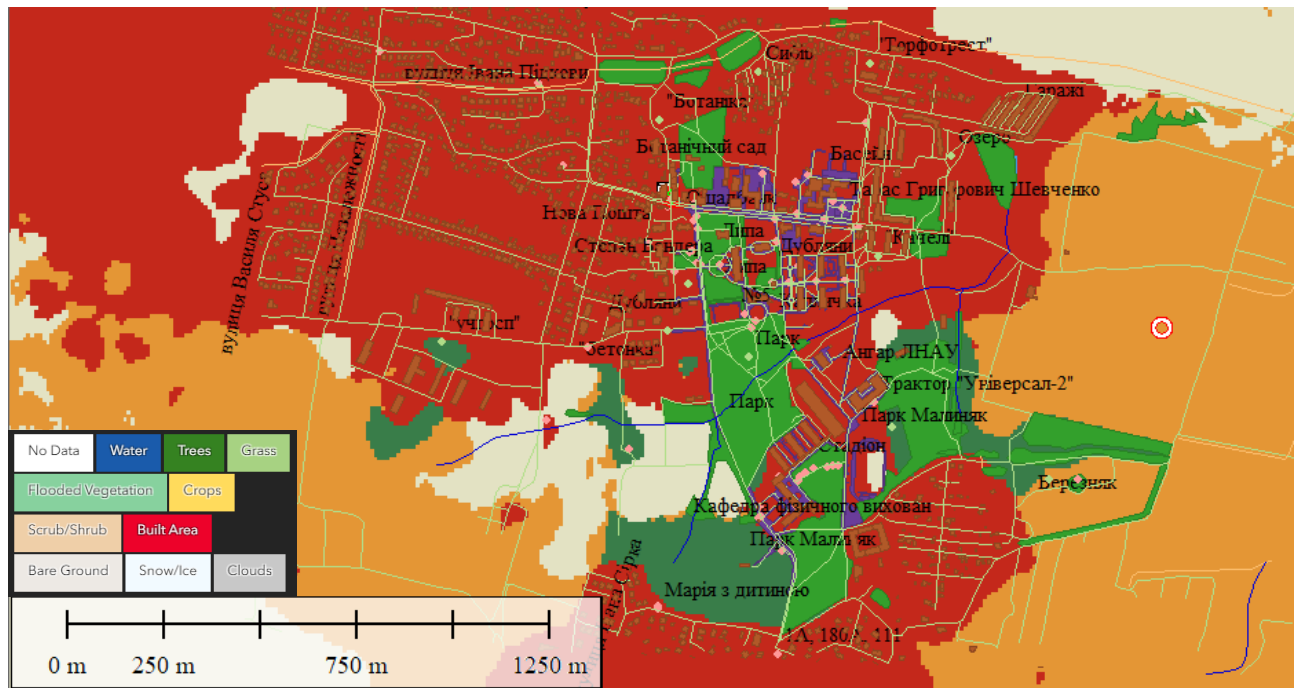


Рис.2.1. Територія м.Дубляни на карті LULC (Land Use Land Cover) з доданими картографічними шарами Open Street Map

Рельєф досліджуваної території горбистий, з перепадами відміток висот від 217м до 280м (система висот Балтійська 1977року). Безпосередньо в межах території університету (загальна площа 4,16 га) перепад висот складає 16,6м. Південно-східну частину території ділянки займає парк «Малиняки». Територію приблизно порівну розділяє балка, на схилах якої розміщено парк «Дублянський» (площа 2,61 га), а на південному та північному плато розміщено будівлі університету. Балкою протікає струмок, який є правою притокою річки Яричівка – притоки р. Полтва в Басейні р. Західний Буг.

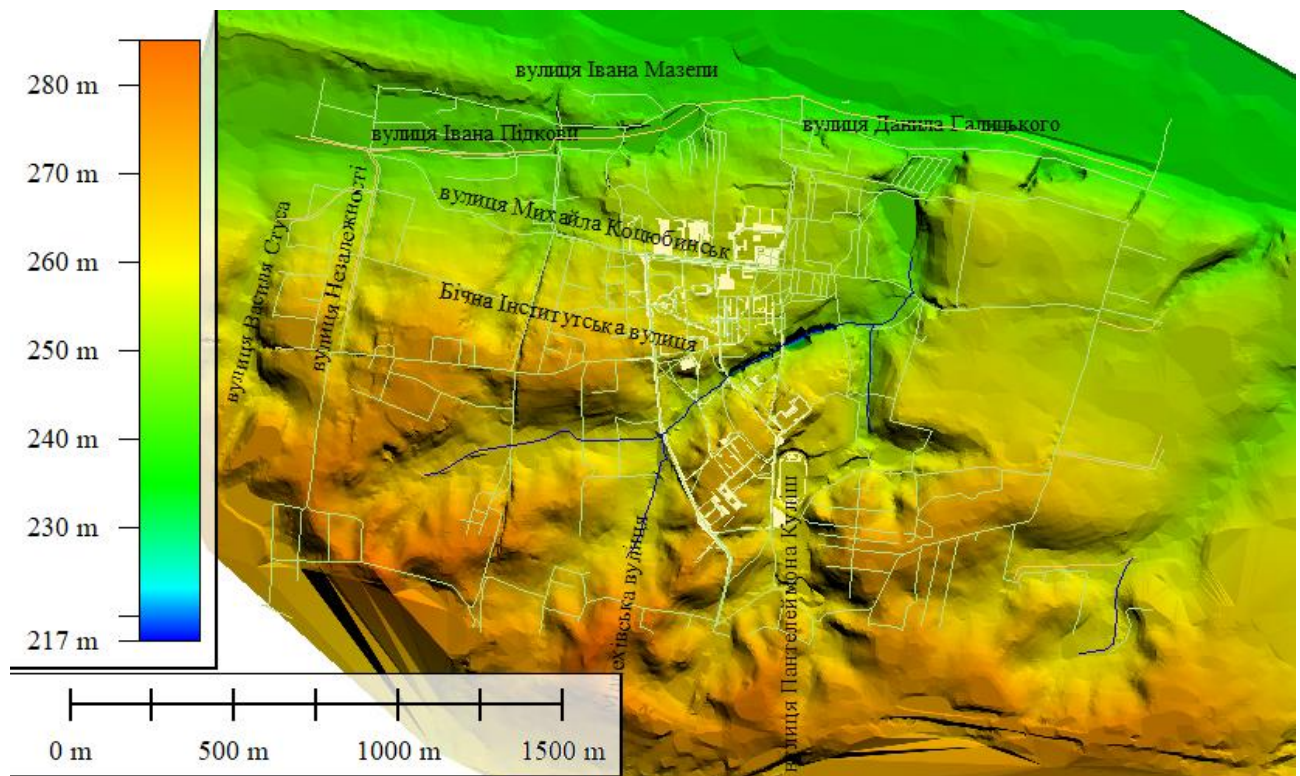


Рис.2.2. Рельєф досліджуваної території

Річкова мережа Львівщини в її північній частині мають на 50% дощове живлення, 37% припадає на снігове і 13% — на підземне. Середня густота річкової сітки в басейні Західного Бугу становить $0,35 \text{ км/км}^2$. На території м.Дубляни основний стік із зворотними водами відбувається у внутрішньогосподарський канал К-4-03 - притоку річки Яричівка (Канал Яричівський, Водогосподарська ділянка (код): А6.6.1.01. Долина р. Яричівка (Яричівський канал) переважно трапецієподібна, завширшки 2,5—3 км, завглибшки до 30 м. Заплава двостороння, є заболочені ділянки. Річище слабо і помірно звивисте, на значному протязі (35 км із загальної довжини 45 км) відрегульоване, з'єднане системою каналів із р. Капелівка. Площа басейну 249 км^2 , похил річки $1,5 \text{ м/км}$. Бере початок між селами Малі Грибовичі, Великі Грибовичі та Воля-Гомулецька, Гряда [11, 13].

Основна ділянка університету, де розміщено споруди навчальних корпусів, гуртожитків, стадіону має площу 53.0811 га та призначення 03.02 «Для

будівництва та обслуговування будівель закладів освіти». Розміщення та фрагмент інформації з Публічної кадастрової карти України приведено на рис.2.3.

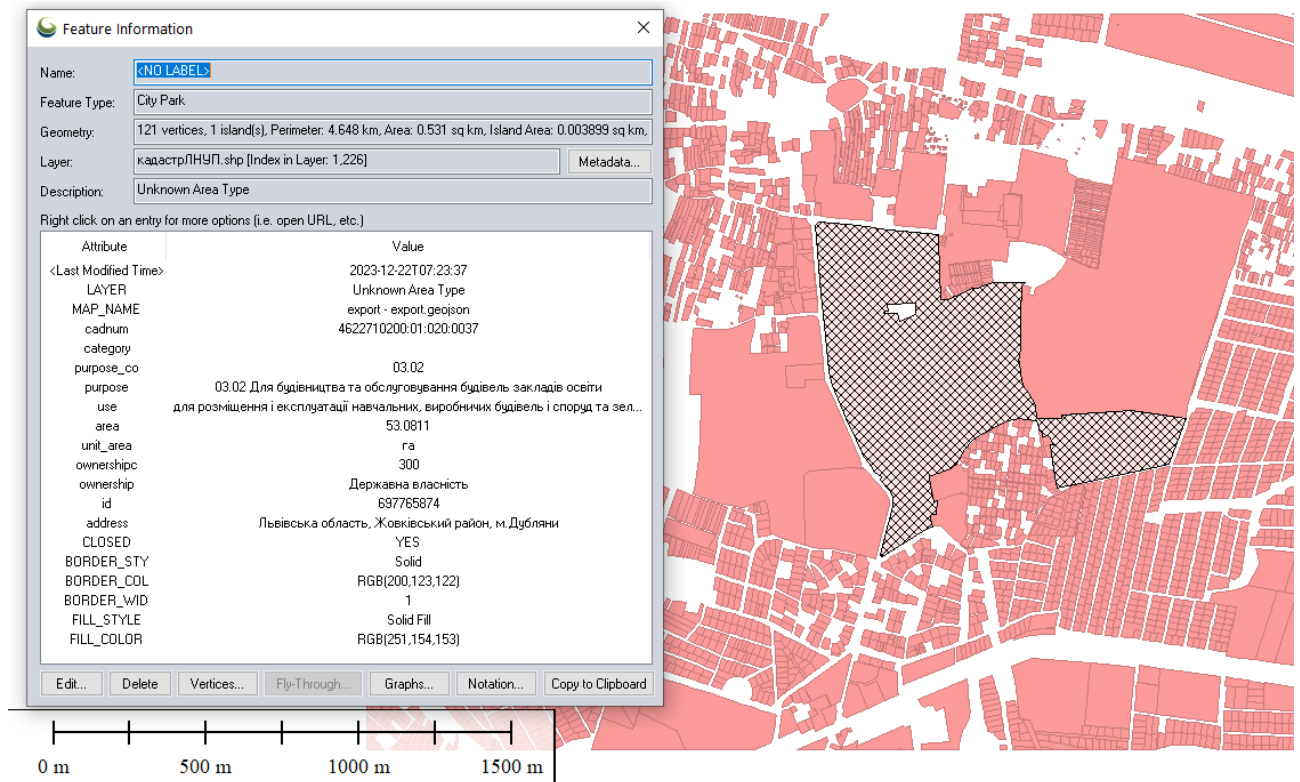


Рис.2.3. Розміщення та кадастрові облікові дані основної ділянки університету

Як матеріал для контролю якості топографічного моделювання нами використовувався цифровий топографічний план м.Дубляни масштабу 1:2000. План складено в системі координат СК-63, стан місцевості на травень 2018 року, перетин рельєфу горизонталями через 1 метр, система висот Балтійська 1977 року. Цифровий план містить картографічну модель рельєфу – цифрове подання рельєфу у вигляді сукупності горизонталей – ліній, що з'єднують точки земної поверхні з однаковою висотою [16]. Також на плані рельєф відображують позначки висот характерних точок місцевості, урізи водних поверхонь та умовні знаки обривів, скель, ярів, осипів, зсувів, ям, курганів та інше. Така модель є похідною від регулярної (DEM) чи нерегулярної форми (TIN) представлення

даних про рельєф, які отримують внаслідок фотограмметричного опрацювання аерознімків (див. рис.1.4).

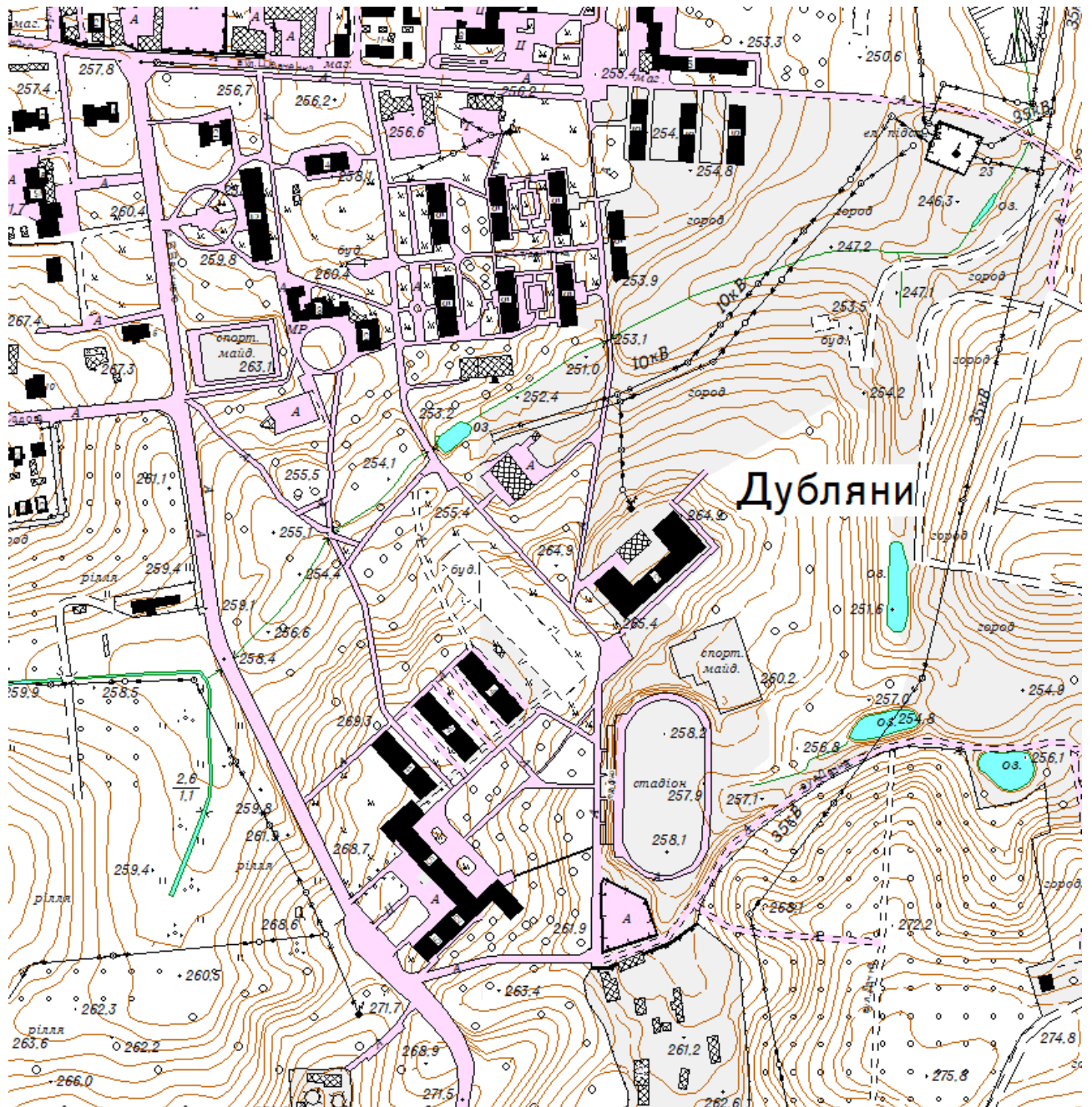


Рис.2.4. Фрагмент цифрового топографічного плану масштабу 1:2000 на територію м. Дубляни.

Висотною основою топографічного плану є БСВ-77 або Baltic77 – Балтійська система висот 1977 року. Різниця геодезичних висот WGS–84 та

нормальних висот в Балтійській системі висот для території України складає 20 – 60 м. Перехід від геодезичних (еліпсоїдальних, які реєструються ГНСС-апаратурою, та в яких подається геоінформація на міжнародних геосервісах) висот WGS-84 до нормальних висот рекомендується використовувати модель українського квазігеоїду (далі – УКГ). Балтійська система висот 1977 року (код EPSG:5705) в Україні застосовується до введення у період до 1 січня 2026 року в дію Об'єднаної Європейської нівелірної мережі / Європейської вертикальної референцної системи 2000 року (системи висот UELN/EVRS2000). Нуль Амстердамського футштоку було обрано як нульову точку для європейської висотної системи відліку [5,10].

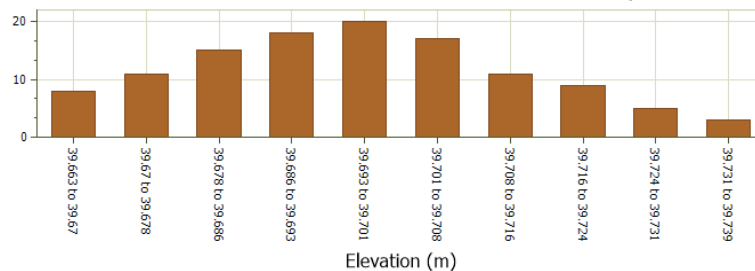
В Україні для виробничих та наукових потреб використовують глобальні моделі гравітаційного поля Землі: EGM2008 (код EPSG:3855) та XGM2019e_2159.

За даними моделі GEOID_UA_XGM2019 [XGM2019e_2159+52cm], яку використовує оператор мережі ZAKPOS (<http://zakpos.zakgeo.com.ua>) на території м. Дубляни Львівської області висоти геоїда над поверхнею еліпсоїда складають від 3969см на південно-східній околиці до 3971см на північно-західній околиці досліджуваної ділянки. Ізолінії цих висот показано синім кольором на рис.2.6.

За моделлю геоїда Geoid EGM08_11 for Ukrain, яка інтегрована в програмний продукт Digitals на досліджуваній території висоти коливаються в незначному діапазоні змін від 3079 см на південно-східній околиці до 3084см на північно-західній околиці. Ізолінії цих висот показано червоним кольором на рис.2.5.



GEOID_UA_XGM2019 XGM2019e_2159+52cm Дубляни.tif



Geoid EGM08_11 for Ukraine.GGF [Combined Grid Дубляни].tif

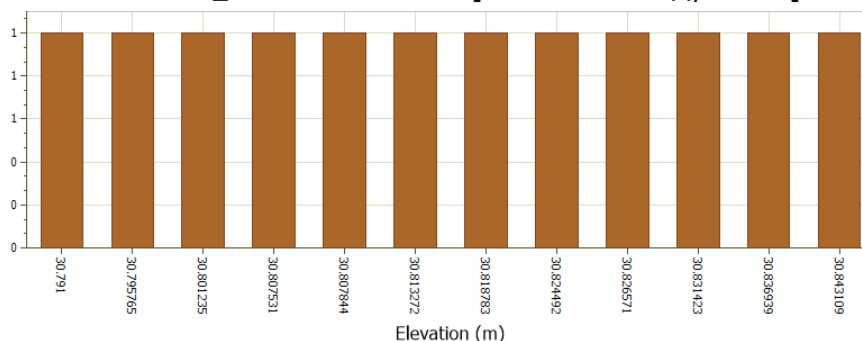


Рис.2.5. Дані моделі GEOID_UA_XGM2019 [XGM2019e_2159+52cm] оператора мережі ZAKPOS (ізолінії синього кольору) та Geoid EGM08_11 for Ukrain (ізолінії червоного кольору) на досліджуваній території (ЛНУП, м. Дубляни Львівської області. Крок проведення ізоліній 1см.

На рис.2.5. представлено ізолінії висот, інтерпольовані з кроком 1см за растровою моделлю геоїда, яка має просторове розрізнення 7x5 метрів. Гістограма показує розподіл поправок у геодезичні висоти, які вводяться для переходу до нормальних висот. В межах досліджуваної території вони коливаються для моделі геоїда XGM2019 від 39.66 м. до 39.74 м. та в діапазоні значень 30.79-30.84 м для моделі геоїда EGM 08.

2.2. Вдосконалення наземної опорної геодезичної мережі на території ЛНУП для моделювання місцевості за аерознімками з БПЛА

Використання наземних контрольних точок є важливим компонентом фотограмметричної технології на основі БПЛА. Наземні опорні і контрольні точки (GCP) — це помітні точки на землі з відомими координатами, які можна використовувати для точного відображення та вимірювання об'єктів у фотограмметричних моделях, створених БПЛА. Ці опорні точки мають бути добре помітними на аерознімках.

На території ЛНУП існує мережа закріплених та маркованих на місцевості пунктів знімальної геодезичної мережі. Каталог координат пунктів цієї мережі складено в системі координат СК-63, а висоти подано в Балтійській системі висот 77 року. Мережа складається з 67 пунктів (рис.2.6.).

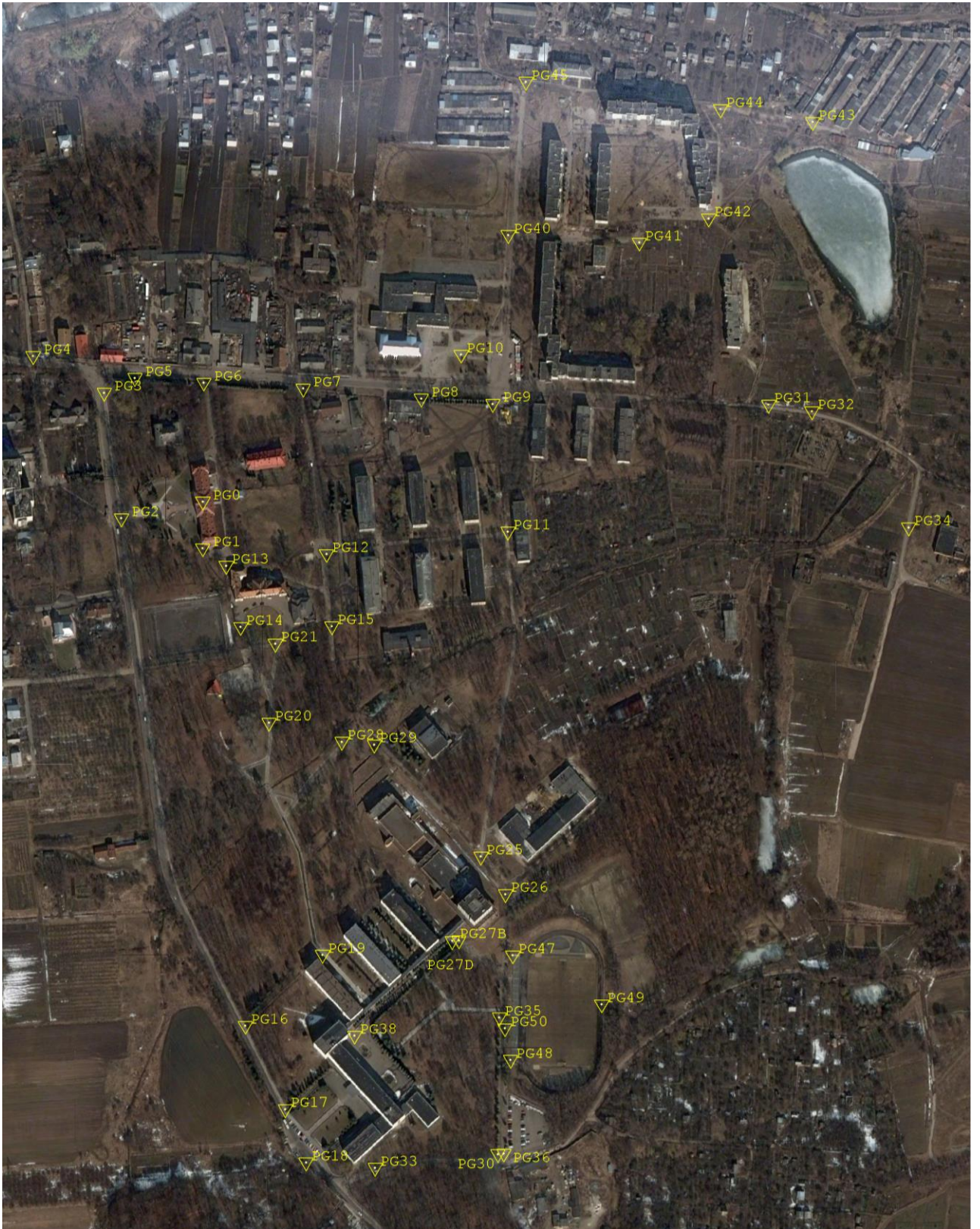


Рис.2.6. Мережа закріплених та маркованих на місцевості пунктів знімальної геодезичної мережі на території ЛНУП.

В 2021-2023 роках відбулось оновлення маркувань на місцевості, перевизначення просторових координат і додавання у цю мережу нових пунктів. Для координування планово-висотних опознаків застосовувалась зйомка методом Глобальних навігаційних супутникових систем (ГНСС) – це процес виконання супутникових ГНСС-спостережень на точках місцевості з подальшим опрацюванням результатів спостережень та обчисленням координат і висот точок відносно відомих пунктів геодезичних мереж або постійно діючих базових ГНСС станцій. Всього було здійснено оновлення 26 пунктів мережі, координати яких в геодезичній системі WGS84:

1	49.903171690431	24.088506155011	292.4130
2	49.903080622136	24.088542168600	293.2657
3	49.902818302417	24.087864317611	293.8893
4	49.904222271900	24.087828939972	290.6949
5	49.904308046719	24.089262335650	290.0289
6	49.904255645003	24.090686218494	289.5532
7	49.904234117594	24.091974425397	289.2524
8	49.904091150717	24.093414639056	288.3674
9	49.902926107339	24.093538005744	287.5144
10	49.902025019533	24.093739482914	285.8152
11	49.900406260478	24.094270082256	297.8684
12	49.900404996211	24.094248467817	297.8580
13	49.900083259322	24.094368541833	298.4348
14	49.899703858753	24.093787671864	298.4679
15	49.899158112944	24.093466703344	297.2488
16	49.899003544300	24.094037077325	290.9337
17	49.898990966636	24.094679696836	290.7679
18	49.897986297194	24.094728092275	290.8402
19	49.898003377139	24.093914985931	290.9501
20	49.897828533444	24.093425107086	293.7389
21	49.897165181106	24.093485999731	294.4342
22	49.897069504653	24.093572416939	294.3081

23 49.896725845342 24.091197764353 303.0341
24 49.896909553925 24.090905998914 304.2353
25 49.897219838592 24.090448619350 303.5490
26 49.897635316583 24.091452976408 304.3283

Координати пунктів було перераховано в сучасну систему координат УСК 2000 Зона 5, а висоти приведено від геодезичних до нормальних за описаною вище моделлю геоїда «Geoid EGM08_11 for Ukrain»:

1 5534261.666 5290973.116 261.601
2 5534251.438 5290975.309 262.454
3 5534224.162 5290925.487 263.077
4 5534380.387 5290929.022 259.885
5 5534385.920 5291032.343 259.218
6 5534376.116 5291134.384 258.742
7 5534370.126 5291226.813 258.441
8 5534350.209 5291329.636 257.555
9 5534220.308 5291333.464 256.700
10 5534119.542 5291344.044 255.000
11 5533938.050 5291375.165 267.050
12 5533937.970 5291373.607 267.040
13 5533901.857 5291380.843 267.616
14 5533861.286 5291337.481 267.649
15 5533801.493 5291312.069 266.429
16 5533782.713 5291352.372 260.113
17 5533779.523 5291398.478 259.947
18 5533667.665 5291397.617 260.018
19 5533671.832 5291339.284 260.128
20 5533653.755 5291303.340 262.917
21 5533579.818 5291304.849 263.611
22 5533568.938 5291310.643 263.485
23 5533537.349 5291138.579 272.211
24 5533558.592 5291118.414 273.413
25 5533594.374 5291086.900 272.727
26 5533637.772 5291160.842 273.507

Роботою керували доц. Рій І.Ф., Бочко О.І. Частину пунктів складають контурні точки, а інші – маркувались фарбою з допомогою спеціально виготовленого трафарета.



Рис.2.7. Координування пунктів знімальної мережі

2.3. Технологія цифрового моделювання місцевості за аерознімками з БПЛА

Технологічна схема є послідовністю взаємопов'язаних технічних і організаційних процесів, в результаті виконання яких отримують цифрову модель місцевості. При створенні моделей місцевості по матеріалам аеро- і космічних знімків зазвичай виконуються наступні процеси (рисунок 2.9):

- розробка техніко-економічного проекту;
- виконання аеро- або космічної зйомки;
- геодезична прив'язка знімків;
- дешифрування знімків;
- фотограмметричне опрацювання знімків і отримання цифрових моделей місцевості.

Кожен із перелічених процесів має свої особливості та способи реалізації. Тому їх поєднання призводить до багатьох варіантів технологій при створенні цифрових моделей місцевості. На вибір технологічної схеми перш за все впливає вид кінцевої продукції: потрібна метрична точність, зміст і обсяг семантичної інформації моделі. Істотними факторами, що визначають вибір технології, є технічне забезпечення (комп'ютери, програми, пристрої введення-виведення), кваліфікація виконавців і терміни виконання робіт.

Фотограмметричне програмне забезпечення для опрацювання матеріалів аерознімання з БПЛА використовує автоматизовані алгоритми створення ЦМР та ортофотопланів.

Найпоширенішим застосуванням, яке використовує аерофотознімки, зроблені з БПЛА, є техніка, яка називається фотограмметрією структури з руху (SfM). SfM — це потужний інструмент, який використовує комп'ютерні алгоритми для визначення відповідних елементів у колекції зображень, що перекриваються. Потім він зшиває ці зображення, що перекриваються, щоб створити 3D-модель, враховуючи внутрішню геометрію камери, положення та орієнтацію камери.

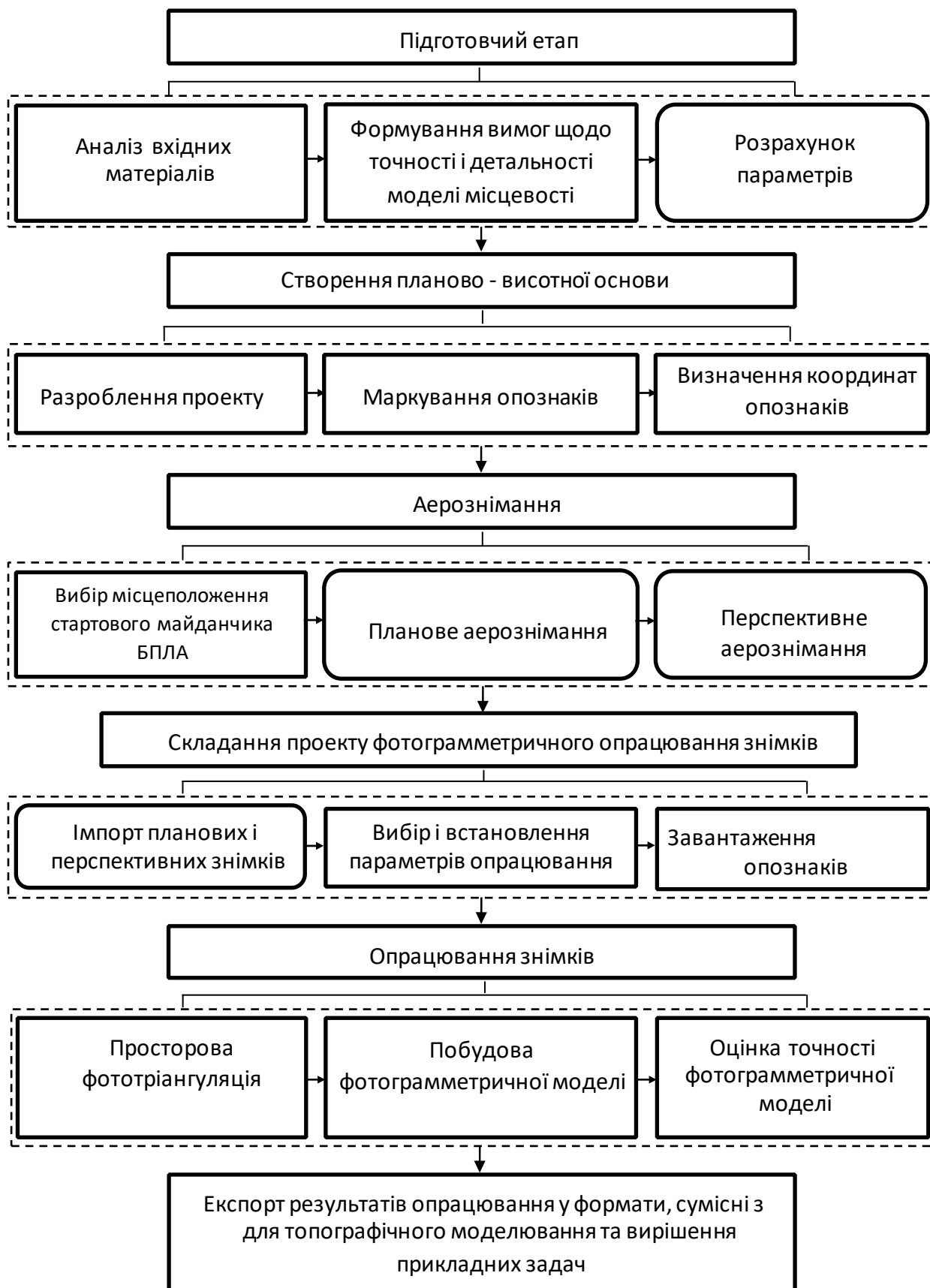


Рис.2. 8. Технологічна схема збору і опрацювання даних аерознімання з БПЛА

Вирівнювання та поєднання зображень, що накладаються, за допомогою триангуляції створює 3D-хмару точок, яка є набором тисяч або навіть мільйонів точок даних, які представляють координати X, Y і Z фотографованої сцени. Ці хмари точок утворюють основу для точної реконструкції 3D-сцен з високим розрізненням (сантиметровим), а також для створення інших вихідних даних, таких як ортомозаїка та цифрові моделі рельєфу (ЦМР).

Важливим компонентом SfM і практики фотограмметрії загалом є забезпечення достатнього перекриття отриманих зображень, щоб не було жодних дірок або даних, які з'єднуються під час постобробки. Щоб уникнути цього, рекомендується мати 75% вертикальне (в маршруті) і 60% горизонтальне (міжмаршрутне) перекриття зображень (рис.2.10).

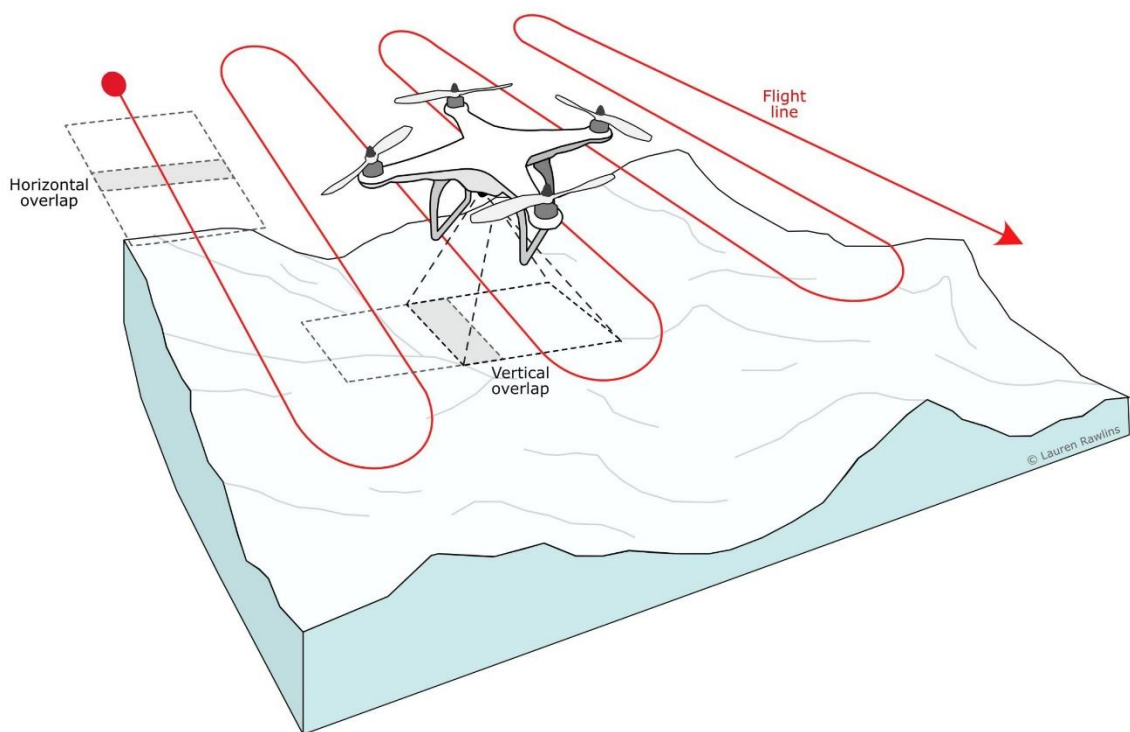


Рис.2.9. Схема знімання БПЛА, що показує загальну лінію польоту (червоним кольором) і горизонтальне та вертикальне перекриття, необхідні для повного збору зображень досліджуваної сцени (без пропусків або втрати інформації).

Крім того, збір ряду зображень під різними кутами нахилу камери також допомагає охопити всю досліджувану сцену. Це може означати, наприклад, політ по схемі двох сіток, повернутих одна до одної на 90 градусів. Для якісної 3D-реконструкції область інтересу повинна мати текстуру.

Цей інструмент залежить від руху камери, а сцена залишається статичною. Визначним параметром, який визначає детальність та точність створених фотограмметричних моделей є розмір проекції пікселя камери на місцевість GSD (ground sample distance):

$$GSD = (\textit{pixel element size}) \times H / f \quad (2.1)$$

або

$$GSD = (\textit{sensor width/image width in pixels}) \times H / f \quad (2.2)$$

де f – фокусна відстань об'єктива цифрової фотокамери, H – висота фотографування (перевищення камери над місцевістю), $\textit{sensor width}$ – лінійний розмір матриці пікселів цифрової фотокамери, $\textit{image width in pixels}$ – кількість пікселів в рядку матриці пікселів цифрової фотокамери.

Для опрацювання матеріалів аерознімання території ЛНУП використовувалась спеціальна комп'ютерна програма Pix4Dmapper. Передбачено виконання опрацювання знімків в цій програмі за три етапи.

1. Первинне опрацювання. На цьому етапі зображення, їхні EXIF-файли, файли запису маршрутів польоту та каталоги наземних опорних точок (GCP) використовують для виконання наступних завдань.

- Виділення зв'язкових точок в зонах взаємного перекриття знімків на основі математичного апарату алгоритмів пошуку (детектори) і цифрового опису (дескриптори) особливих точок цифрових зображень.
- Зіставлення дескрипторів особливих точок цифрових зображень для пошуку ідентичних (зв'язкових) точок на різних зображеннях.

- Оптимізація моделі камери: калібрування внутрішніх (фокусної відстані, координат головної точки знімка) та зовнішніх (орієнтація в геодезичному просторі) елементів орієнтування знімків.
- Геолокація: визначається місцезнаходження фотографічної моделі якщо є інформація про геолокацію.

На даному етапі створюються автоматичні зв'язкові точки та отримують елементи внутрішнього та зовнішнього орієнтування знімків. Це основа для наступного етапу обробки.

2. Хмара точок та текстурована поверхня

На основі елементів орієнтування знімків та вимірів положення на знімках зв'язкових точок відбуваються такі процедури:

- Ущільнення хмари 3D точок. Максимальна досяжна щільність в добре текстурованих, незатінених областях може перевищувати параметр GSD.
- Побудова текстурованої 3D поверхні на основі щільної хмари точок.

3. Цифрова модель місцевості (ЦММ), Ортофотоплан та Карти індексів. Цей пункт дає можливість створити:

- Створення цифрової моделі місцевості (ЦММ) у виді полігональної моделі, яка дає можливість обчислювати об'єм насипів і виїмок, будувати ортофотоплан і карту відбиття.
- Створення ортофотоплану ґрунтується на процедурі ортотрансформування. За допомогою цього методу усувають перспективні і масштабні спотворення із зображень.
- Створення растрової карти (Карта відбиття), де значення кожного пікселя має точне значення коефіцієнту спектрального відбиття об'єкту. Це дозволяє виконувати інтерпретацію ортофотопланів та вивчати територію.

Розділ 3. ЦИФРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЛЬЄФУ ТА ПІДСТИЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ АКАДЕМІЧНОГО МІСТЕЧКА ЛНУП

3.1. Характеристика аерофотознімків, отриманих з безпілотних літальних апаратів

Під час виконання експериментальних робіт ми вивчаємо можливості аерознімання з БПЛА для оперативного створення надійних ЦМР високої точності та розрізнення, призначених для подальшого геоморфометричного моделювання.

Аерознімання виконане за два льотні дні в березні-квітні 2021 року. Відповідно було отримано 3 фотограмметричні блоки які взаємно перекриваються із загальною кількістю 632 аерознімків, якими прокрита територія площею 63,4 га.

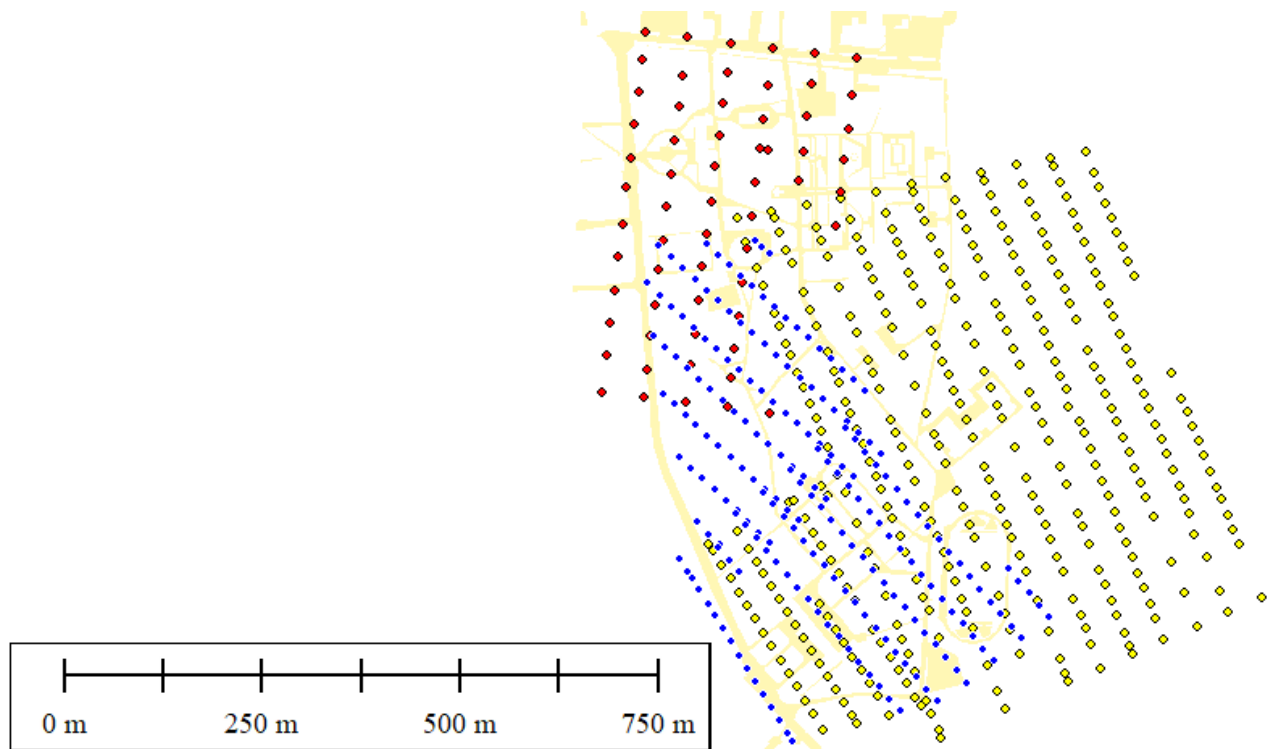



Рис.3.1. Схема центрів проєкцій блоків аерознімків

1 БЛОК АЕРОЗНІМКІВ. Аерознімання північної частини території ЛНУП виконане квадрокоптером типу DJI Phantom 4 Pro. Отримано 61 знімок з


геодезичної висоти 330м, які на карті 3.1. позначено точками червоного кольору. Технічні та експлуатаційні характеристики цього апарату представлено на рисунку 3.2.




DJI Phantom 4 Pro

ПЕРЕВАГИ


- 20 МП, 1" сенсорна камера з механічним затвором
- Легка, портативна конструкція
- Подвійна система навігації з підтримкою шляхових точок
- Оминання перешкод у 5 напрямках
- Високоточна система наведення
- Висока рентабельність для даного цінового діапазону




Тривалість польоту - 30хвилин




Покриття зніманням території за один політ – до 50 Га




Максимально допустима швидкість вітру – 10 м/с



RGB-камера вбудована, незмінна, на 3-х координатному стабілізаторі механічного типу



Дальність поширення телеметричного сигналу – до 7 км.



Максимальна швидкість – 72 км/год.

Система позиціонування: GPS для автопілота – апаратно-програмного пристрою який забезпечує рух по заданій траєкторії та автоматичну стабілізацію параметрів польоту у відповідності до польотного завдання і команд оператора.

Точність визначення навігаційних параметрів польоту з позиціонуванням по GPS: по вертикалі ± 0.5 м, по горизонталі ± 1.5 м.

Політний контролер: DroneDeploy.


Камера: тип FC330_3.6, 1" CMOS, ефективні пікселі: 20М, кут огляду 84° 4 мм фокусна відстань; Розміри знімків: 3:2 формат: 5472 × 3648 4:3 формат: 4864 × 3648 16:9 формат: 5472 × 3078


Рис. 3.2. Технічні та експлуатаційні характеристики квадрокоптера DJI Phantom 4 Pro.


2 БЛОК АЕРОЗНІМКІВ. Аерознімання південно-західної частини території ЛНУП виконане квадрокоптером типу DJI Mavic 2 Pro 12.04.2021 року. Висота знімання 380м. Отримано 213 знімків, які на карті 3.1. позначено точками синього кольору. Технічні та експлуатаційні характеристики цього апарату представлено на рисунку 3.3.





 Тривалість польоту - 30хвилин

 Покриття зніманням території за один політ – до 70 Га

 Максимально допустима швидкість вітру – 10 м/с

 RGB-камера вбудована, незмінна, на 3-х координатному стабілізаторі механічного типу

 Дальність поширення телеметричного сигналу – до 8 км.

 Максимальна швидкість – 72 км/год.

Система позиціонування: GPS для автопілота – апаратно-програмного пристрою який забезпечує рух по заданій траєкторії та автоматичну стабілізацію параметрів польоту у відповідності до польотного завдання і команд оператора.

Точність визначення навігаційних параметрів польоту з позиціонуванням по GPS: по вертикалі ± 0.5 м, по горизонталі ± 0.5 м.

Політний контролер: DroneDeploy, DJI Smart Controller.

Камера: тип Hasselblad L1D-20c 1" CMOS, ефективні пікселі: 20М, кут огляду 77° 10 мм (28 мм еквівалентна) фокусна відстань; Розміри знімків: 3:2 формат: 5472 × 3648

Рис. 3.3. Технічні та експлуатаційні характеристики квадрокоптера DJI Mavic 2Pro.

3 БЛОК АЕРОЗНІМКІВ. Аерознімання східної частини території ЛНУП виконане квадрокоптером типу DJI Mavic 2 Pro 12.04.2021 року. Висота знімання 380м.

Критерієм для оцінки параметра GSD знімків в фотограмметричних блоках є вимога до необхідності забезпечення детального дешифрування об'єктів в районі вишукувань та точності просторової моделі. Рекомендовані значення параметрів GSD для інженерних вишукувань приведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. - Рекомендовані значення параметра GSD

Масштаб плану	GSD, м
1:500	0.035
1:1000	0.07
1:2000	0.14
1:5000	0.35

Для розрахунку скористаємось формулою зв'язку параметра GSD з висотою знімання і параметрами фотокамери:

$$GSD = (Sw \times H \times 100) / (Fr \times imW),$$

де GSD - розмір пікселя на землі, см/піксел;

Sw - ширина сенсора камери, мм;

Fr - фокусна відстань, мм;

H - висота знімання, м;

imW - ширина кадра, піксел.

Таблиця 3.2. – Розрахунок очікуваних значень параметра GSD

№ блоку	Модель камери	Fr - фокусна відстань, мм;	imW - ширина кадра, піксел	Sw - ширина сенсора камери, мм	pixel_size, фізичний розмір пікселя, мкм	H - висота знімання, м	GSD - розмір пікселя на землі, см/піксел
1	FC330_3.6	3.6702	4000	4.7381	1.5793	80	1.5
2,3	L1D-20c_10.3	10.1983	5472	8.5500	2.3437	125	5.5

Отримані результати розрахунків вказують, що розрізнення аерознімків блоку 1 відповідає масштабу плану 1:500, а блоків 2 та 3 – масштабу 1:1000.

3.2. Створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР, DEM) та ортофотоплану на основі аерофотознімків

Фотограмметричне опрацювання аерознімків здійснювалась в фотограмметричному програмному забезпеченні Pix4Dmapper. Вхідними даними є файли зображень у форматі JPEG, в EXIF-файлах яких записано наближені координати центрів знімків та кутові елементи орієнтування а також текстові файли координат опорних точок та їхні фотоабрис.

Було створено новий проект у програмі **Pix4D mapper**, в який за допомогою пункту меню **Add Image** завантажуються аерознімки з усіх наявних фотограмметричних блоків. Програма за EXIF-файлами зображень автоматично зчитує параметри камер та GPS-положення, зафіксовані в момент отримання кожного знімка. У розділі Selected Camera Model у вікні Image Properties відображаються вибрані моделі камер. В програмі передбачено можливість додавання або видалення зображень під час роботи з проектом за допомогою пункту меню “Add Image” або відповідної кнопки на панелі інструментів.

Після завантаження файлів зображень відкривається вікно геоприв’язки та за допомогою клавіші **From File** завантажуються каталог навігаційних параметрів. Особливістю поточного проекту є те, що відсутні файли GPS треків і відсутні записи IMU модуля який реєструє навігаційні параметри, а саме кути обертання і нахилу знімків в момент їхнього отримання. В усіх трьох блоках геолокація знімків задана в системі *BLH* геодезичних координат WGS84. Після завантаження файлу координат програма вказує що знімки прив’язані (Рис.3.4) і візуалізує графічну схему розміщення центрів проєкцій на електронній карті.

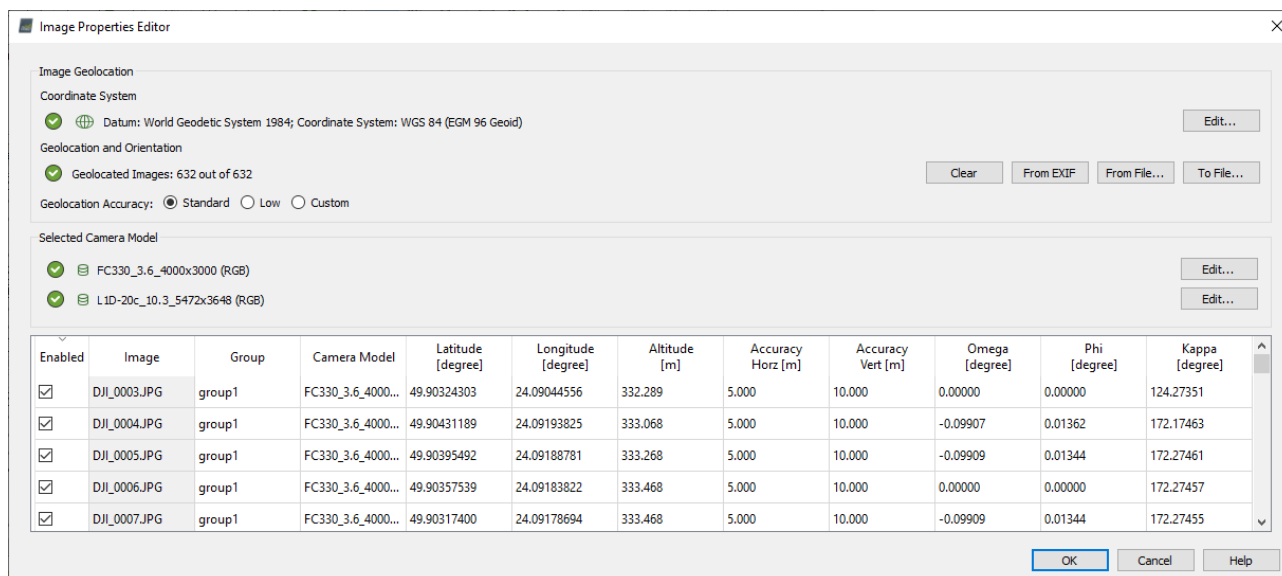
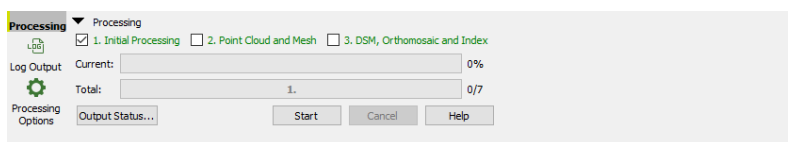


Рис. 3.4. Редактор фотограмметричного блоку знімків

У вікні **Processing Options Template** обираємо один з типових способів опрацювання проекту. В нашому випадку доречним є застосування шаблону **Standard - 3D Maps**, який містить типові налаштування програми для створення щільної хмари 3D точок, ЦМР та ортофотоплану як показано на рисунку 3.5.

Натискають кнопку **Finish** щоб завершити загальні налаштування проекту та відкрити його робоче вікно. На панелі Меню натискаємо **View (Перегляд) > Processing (Опрацювання)**. Панель опрацювання з'явиться внизу головного вікна програми:



Вибираємо вказівником тільки пункт «1. Первинне опрацювання» та вимикаємо етапи «2. Хмара точок і модель» і «3. ЦММ, ортофотоплан та карта індексів». Кнопкою **Start** запускається етап первинного опрацювання даних, під час якого відбувається виділення особливих точок на знімках, з масиву яких буде віднайдено зв'язкові точки в стереопарах за принципом зіставлення зон перекриття знімків. Процес приводить до оптимізації моделей камер, створення хмари зв'язкових точок, наближеної гео локації знімків.

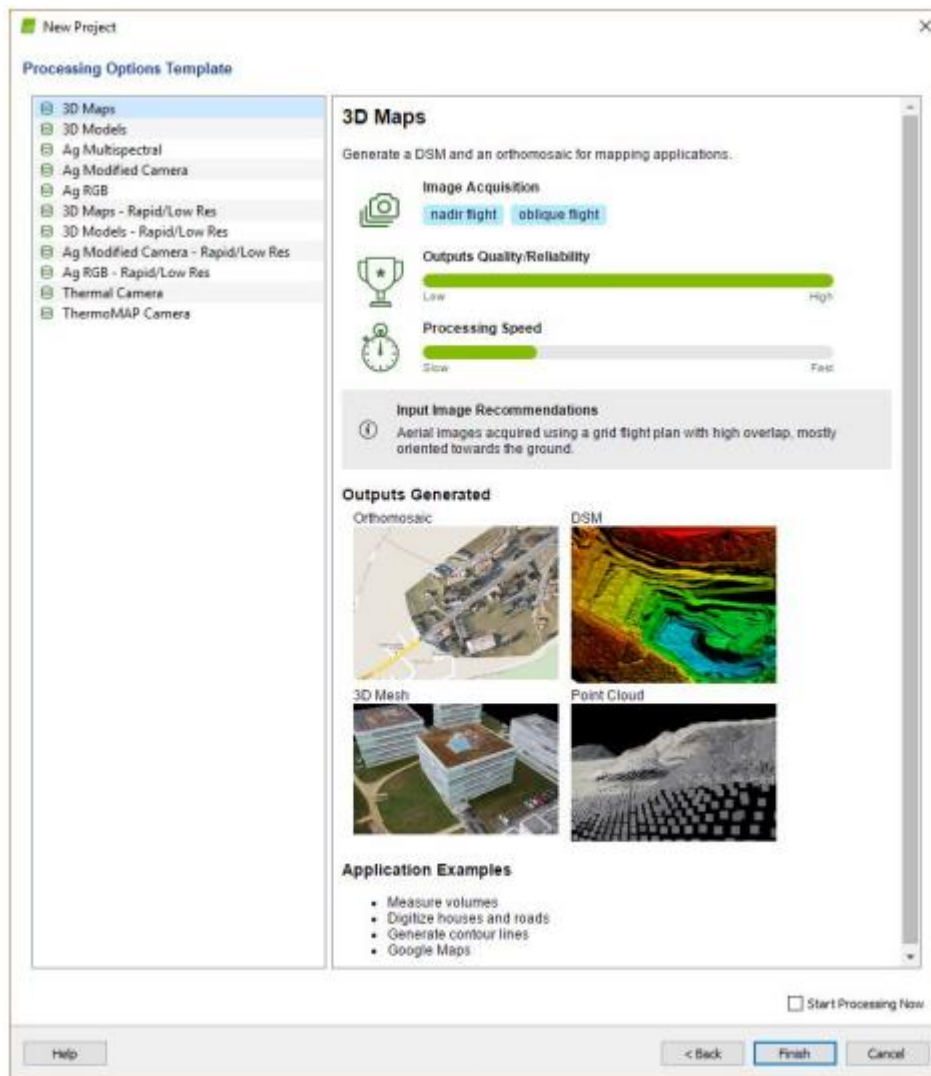


Рис. 3.5. Вибір способу опрацювання проекту з шаблонним налаштуванням в програмі Pix4Dmapper

Після виконання первинної обробки в окремому вікні браузера відображається звіт. Цей документ є протоколом що висвітлює проблеми з наявністю і цілісністю даних, дає оцінку кількісних і якісних характеристик створеної фотограмметричної моделі. На підставі звіту можна внести корективи в набори даних, відбракувати помилкові записи в файлах, змінити налаштування етапу первинного опрацювання даних.

Подальшим кроком виконання проекту є завантаження каталогу координат опорних і контрольних точок за допомогою функції **GCP/MTP Manager**. Клавішею **Import GCPs** завантажується файл з координатами наземних опорних та контрольних точок. Допустимим є випадок, коли геолокація аерознімків,

координати опорних точок та створювані цифрові моделі місцевості знаходяться в різних системах координат. У такому випадку можна вибрати системи координат із спеціальної бази даних, що постачається з програмою Pix4Dmapper. Pix4Dmapper може здійснювати трансформацію між двома з відомих і описаних в його базі даних системами координат. В поточному проекті встановлено та використовуються такі системи координат:

- Image Coordinate System WGS 84 (EGM 96 Geoid);
- Ground Control Point (GCP) Coordinate System GCS_WGS_1984 (EGM 96 Geoid);
- Output Coordinate System WGS 84 / UTM zone 35N (EGM 96 Geoid).

За допомогою функції **Basic Editor** вибрані в каталозі опорні точки візуально розпізнаються на знімках людиною-оператором. Оператор самостійно, вручну позначає точне розміщення опорної точки щонайменше на 2 знімках блоку натисканням лівої кнопки миші. Програма автоматично підбирає знімки, на яких можливе розміщення даної опорної точки. На кожному оператор уточнює розміщення точок. Після підтвердження точка в списку набуває відповідного статусу – контрольна, опорна планова (2D) або опорна просторова (3D).

Позначати опорні точки можна також в інтерфейсі **rayCloud**. На лівій боковій панелі у розділі Layers (Шари), натискаємо **Tie Points (Зв'язкові точки)**, потім активуємо кнопку *GCPs / MTPs*. Відобразиться список опорних точок.

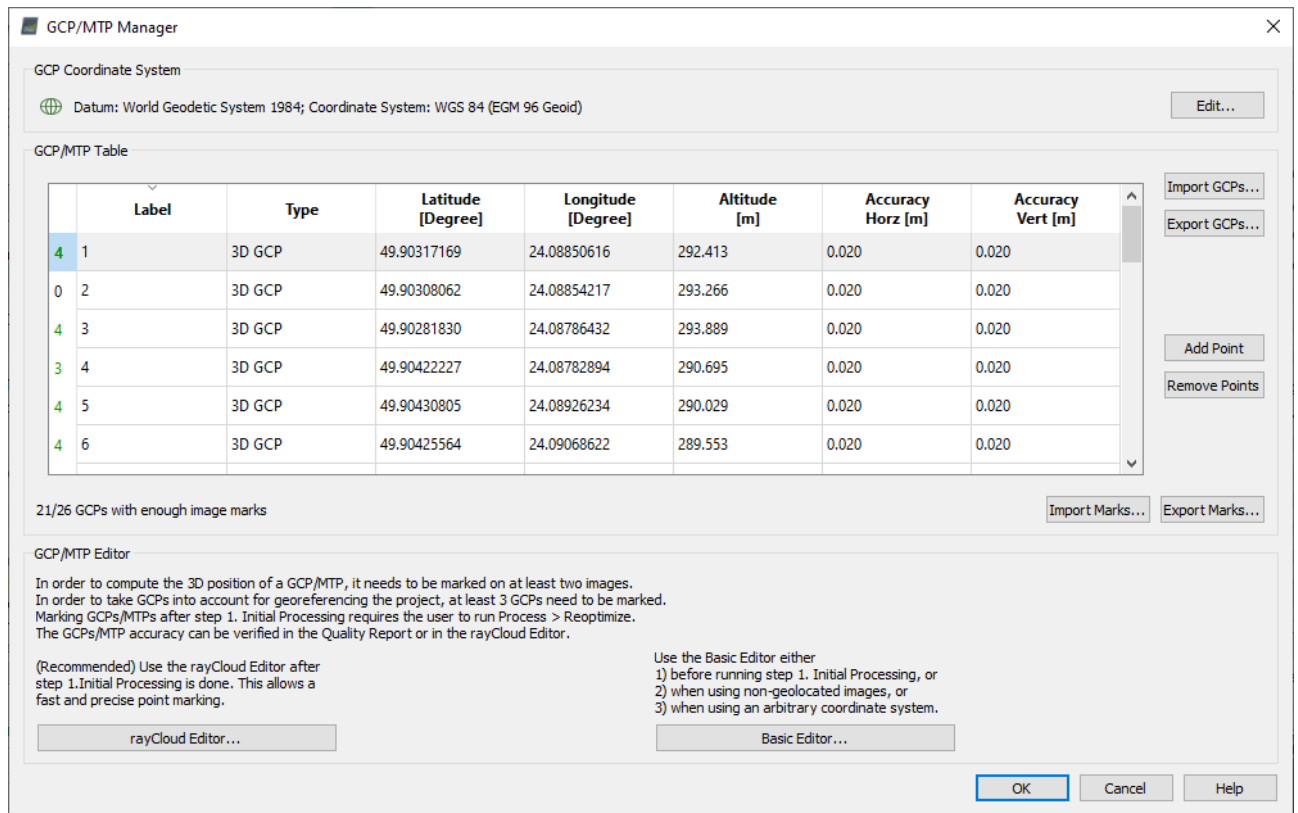


Рис. 3.6. Завантажений в програму каталог опорних точок.

Почергово вибираємо опорні точки на шарі *GCPs* / *MTPs*: на правій бічній панелі відобразяться їхні властивості і список зображень, на яких їх може бути видно. Необхідно позначити точну позицію кожної опорної точки принаймні на 2 зображеннях натисканням лівою кнопкою миші. Коли на більшості зображень зелений хрестик над зображеннями опорної точки знаходиться у правильному положенні, натискають кнопку **Apply (Застосувати)**.

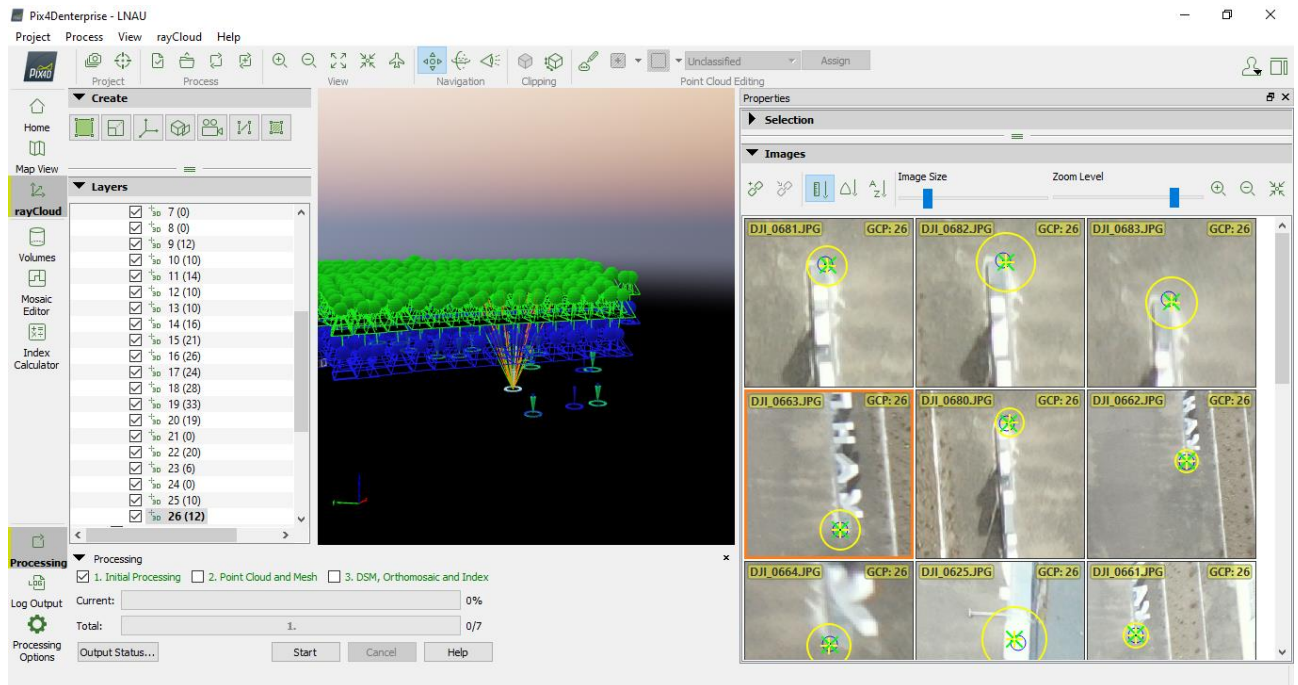
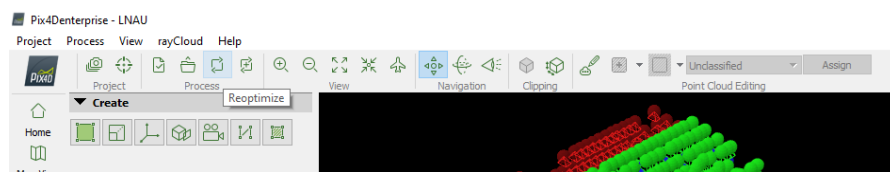


Рис.3. 7. Вимірювання положення опорних точок. Точка №26 (її координування показано на рис. 2.8) зобразилась на 12 аерознімках.

Натискають в меню **Process (Процес) > Reoptimize (Повторна оптимізація)**:



Після завершення знову генерують звіт про якість **Process (Процес) > Generate Quality Report (Створити Звіт про якість)**.

Проаналізувавши звіт якості та виконавши прив'язку опорних точок, робимо висновок, що із 632 знімків проекту 520 успішно пройшли процедуру калібрування і для них були визначені елементи орієнтування. Середні квадратичні помилки урівнювання блоку по опорних точках: $m_x=0.05$ м $m_y=0.04$ м $m_z=0.06$ м.

Calibration Details

Number of Calibrated Images	520 out of 632
Number of Geolocated Images	632 out of 632

Ground Control Points

GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
1 (3D)	0.020/0.020	-0.073	0.043	0.017	1.092	4 / 4
3 (3D)	0.020/0.020	-0.072	0.084	-0.049	1.474	4 / 4
4 (3D)	0.020/0.020	-0.061	-0.024	-0.024	0.405	3 / 3
5 (3D)	0.020/0.020	-0.015	-0.127	-0.014	0.572	4 / 4
6 (3D)	0.020/0.020	0.161	0.002	0.056	0.798	4 / 4
9 (3D)	0.020/0.020	0.039	-0.011	-0.063	0.662	12 / 12
10 (3D)	0.020/0.020	-0.027	0.052	0.066	0.647	10 / 10
11 (3D)	0.020/0.020	-0.053	-0.048	-0.062	0.882	14 / 14
12 (3D)	0.020/0.020	0.039	0.019	0.000	0.650	10 / 10
13 (3D)	0.020/0.020	0.019	-0.010	0.056	0.528	10 / 10
14 (3D)	0.020/0.020	0.016	0.033	-0.011	0.651	16 / 16
15 (3D)	0.020/0.020	-0.019	0.031	0.028	0.706	21 / 21
16 (3D)	0.020/0.020	-0.031	-0.004	0.051	0.901	26 / 26
17 (3D)	0.020/0.020	0.015	-0.012	-0.048	0.624	24 / 24
18 (3D)	0.020/0.020	-0.031	-0.001	0.049	0.752	28 / 28
19 (3D)	0.020/0.020	-0.005	0.015	-0.037	0.505	33 / 33
20 (3D)	0.020/0.020	0.041	-0.031	-0.054	0.460	19 / 19
22 (3D)	0.020/0.020	-0.005	-0.013	0.010	0.507	20 / 20
23 (3D)	0.020/0.020	-0.028	0.022	0.001	1.212	6 / 6
25 (3D)	0.020/0.020	0.008	-0.006	0.133	0.901	10 / 10
26 (3D)	0.020/0.020	0.059	0.016	-0.147	0.574	12 / 12
Mean [m]		-0.001168	0.001540	-0.001889		
Sigma [m]		0.051758	0.041095	0.059219		
RMS Error [m]		0.051771	0.041123	0.059250		

Рис.3.8. Результати першого етапу опрацювання знімків.

Виконуємо наступний - другий етап опрацювання **Point Cloud and Mesh**. Це тривалий процес, в ході якого відбувається ущільнення хмари 3D точок та при необхідності (опційно) створюють 3D -текстурованої поверхні. Після виконання даного етапу звіт по якості доповнюється відповідними даними щодо якості виконання цього етапу.

3-й фінальний етап опрацювання «**DSM, Orthomosaic and Index**» буде ЦММ, ЦМР, ортофотоплан, карту відбиття та карту індексів. Звіт якості знову доповнюється даними про якість виконання цього етапу обробки. Після виконання 3-го етапу всі створені цифрові моделі, а саме ЦМР, ЦММ, карти

горизонталей та ортофотоплан буде записано у відповідні файли на жорсткий диск комп'ютера.

Всі пройдені етапи опрацювання аерознімків з основними налаштуваннями показано на рис.3.9.

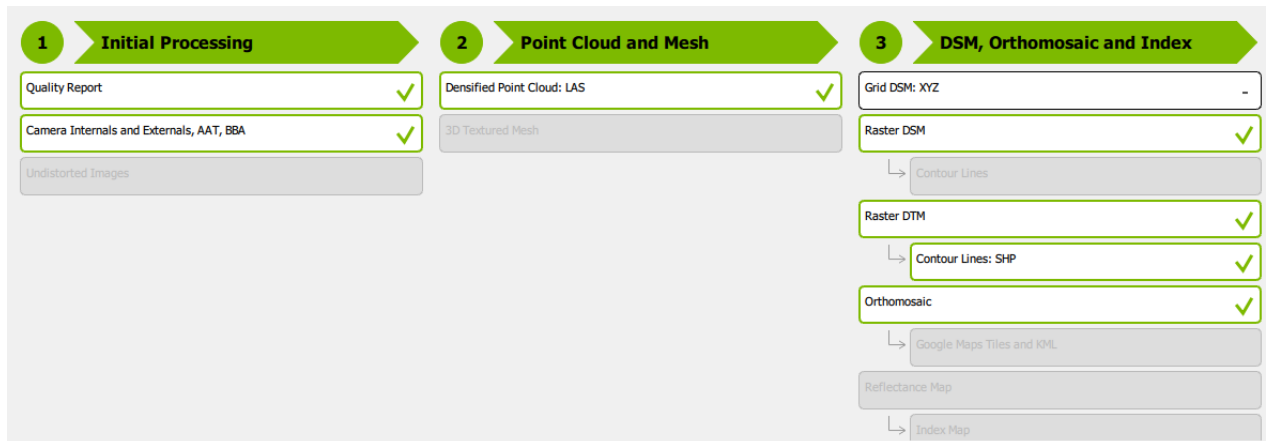


Рис.3.9. Виконані етапи опрацювання аерознімків в програмні Pix4D.

Ортофотоплан побудовано з такими параметрами:

Система координат: WGS_1984_UTM_Zone_35N.

Формат файлу: 4-х каналне растрове зображення формату GeoTIFF;
розрядність 8 Bit / Канал / Піксел; Об'єм 1,17Gb.

Розмір растру: 16151 x 19389 пікселів.

Растрова ЦМР побудована з такими параметрами:

Система координат: WGS_1984_UTM_Zone_35N.

Формат файлу: 1-х каналне растрове зображення формату GeoTIFF;
розрядність 32 Bit / Піксел; Об'єм 1,17Gb.

Розмір растру: 1615 x 1938 пікселів.

Розрізнення: 0.5м x 0.5м.

Ортофотоплан на було використано для векторизації водонепроникних покриттів на території університету – бетонованих та брукованих ділянок.

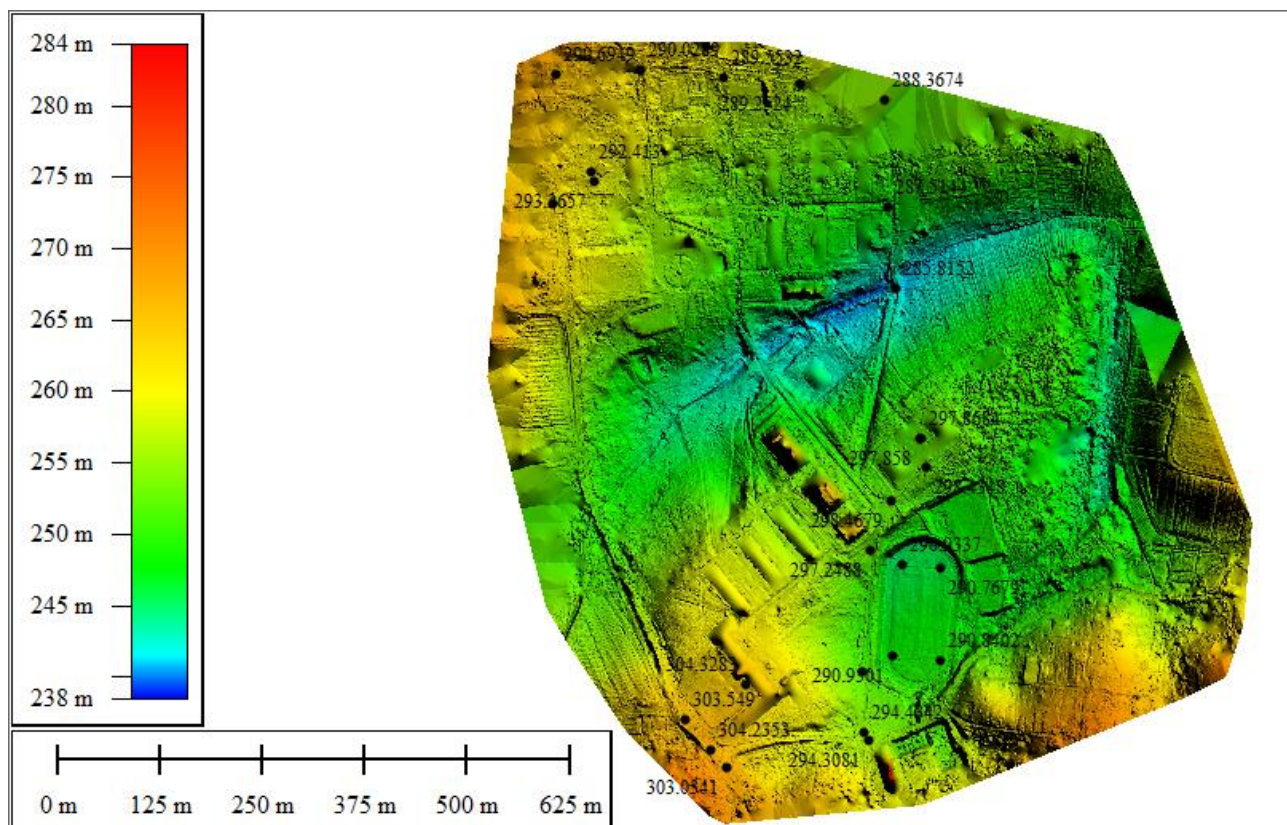


Рис.3.10. Результати опрацювання блоку аерознімків: Цифрова модель рельєфу та ортофотоплан на територію ЛНУП

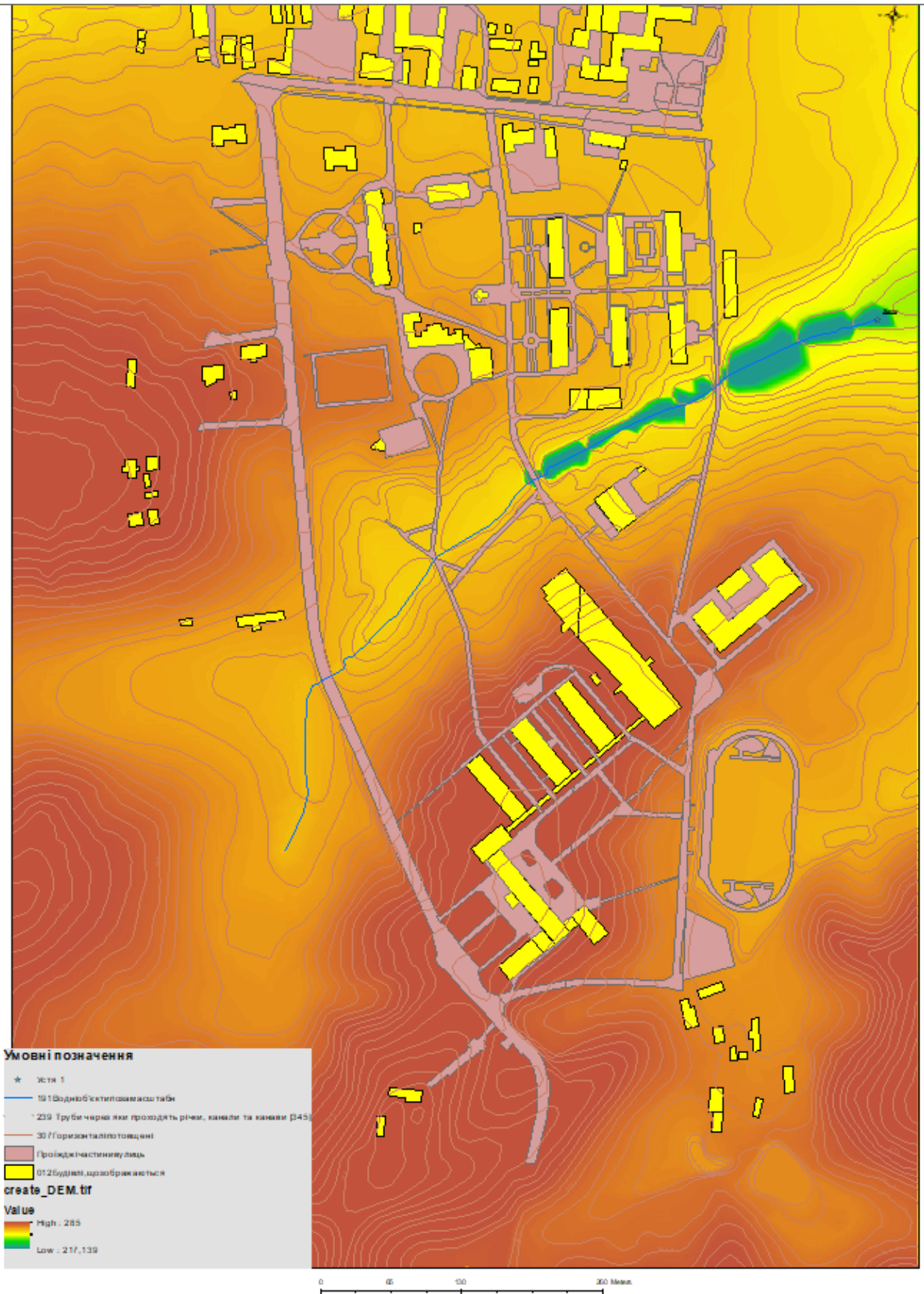


Рис.3.11. План водонепроникних поверхонь на території університету.

3.3. Оцінка точності цифрової моделі рельєфу

Отриману в результаті фотограмметричного опрацювання растрову ЦМР представлено в геодезичній еліпсоїдальній системі висот WGS84. Для переходу до нормальних висот відносно геоїда EGM2008 в програмі ArcMAP з допомогою інструмента «Алгебра карт» до відміток кожного пікселя ЦМР було введено поправки у відповідності із значеннями растрового поля переходу, описаного в 2 розділі цієї роботи.

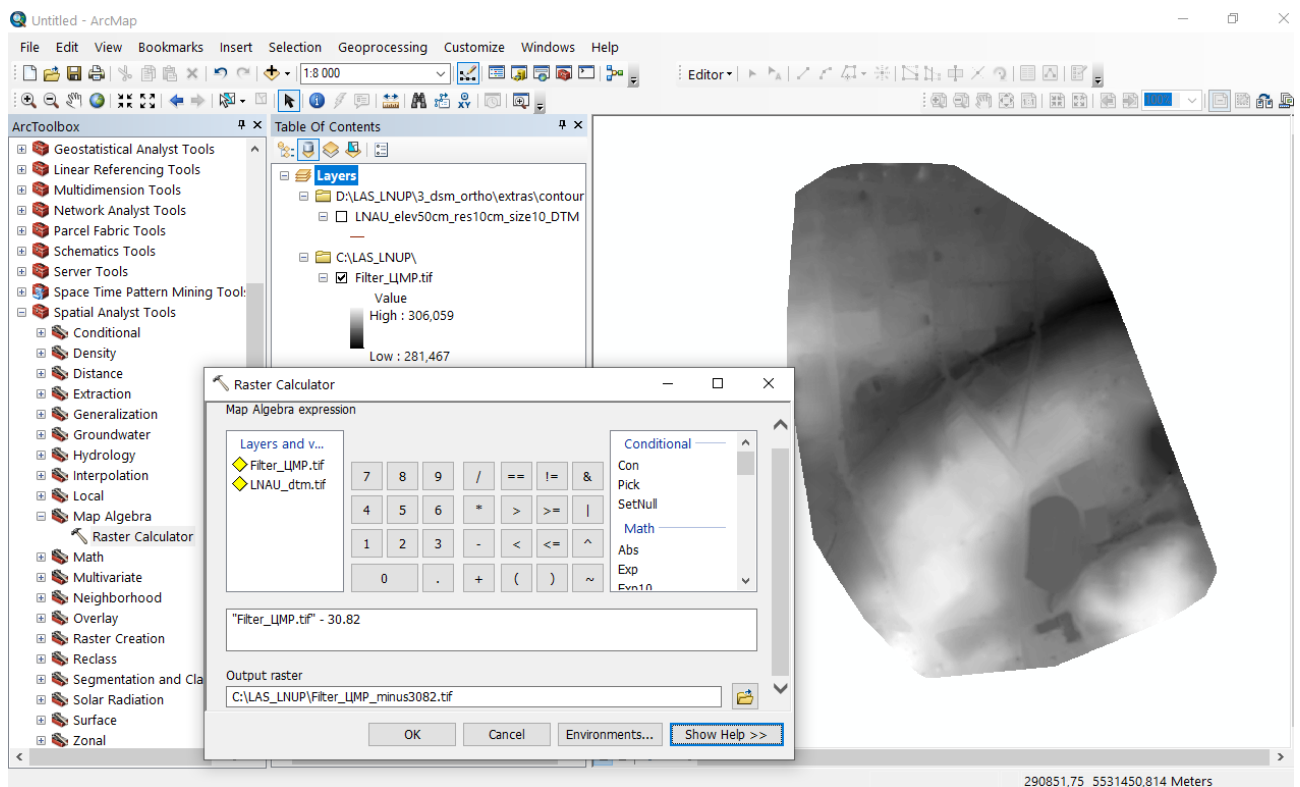


Рис.3. 12. Перерахунок матриці ЦМР до нормальних висот квазігеоїду EGM2008 в програмі ArcMAP

Для незалежного оцінювання точності растрової ЦМР використовувались дані цифрового топографічного плану в масштабі 1:5000, з якого були відібрані шари горизонталей і висотних відміток. Ці шари експортовані з файлу плану Digitals у файли dfm ESRI shp з присвоєнням координатної системи СК63, Зона 1. В програмі ArcMAP створено точковий шейп-файл, який рівномірно покриває

контрольними точками ділянку створеної ЦМР. Ці точки розміщено безпосередньо в пікетних точках та на горизонталях щоб уникнути необхідності обчислень відміток висот. Всього створено таким чином 55 контрольних точок з відомими координатами XY в системі координат СК63 та координатами Z в Балтійській системі 1977 року.

Для зручного відстеження відхилення наявної растрової ЦМР від положення контрольних точок в атрибутивну таблицю шару цих точок введене числові поля, які містять значення координат Z відносно поверхні геоїда (вони взяті з топографічних точок і горизонталей і будуть вважатись еталонними) та поле, в яке переносимо значення координат Z з растрової ЦМР. Скористаємось програмним інструментом **ArcMAP - 3D Analyst Tools - Update Feature Z** для того, аби точки набули значень висот з растрової ЦМР. Після виконання цього інструмента в атрибутивній таблиці створюємо нове числове поле для відображення значень цих висот.

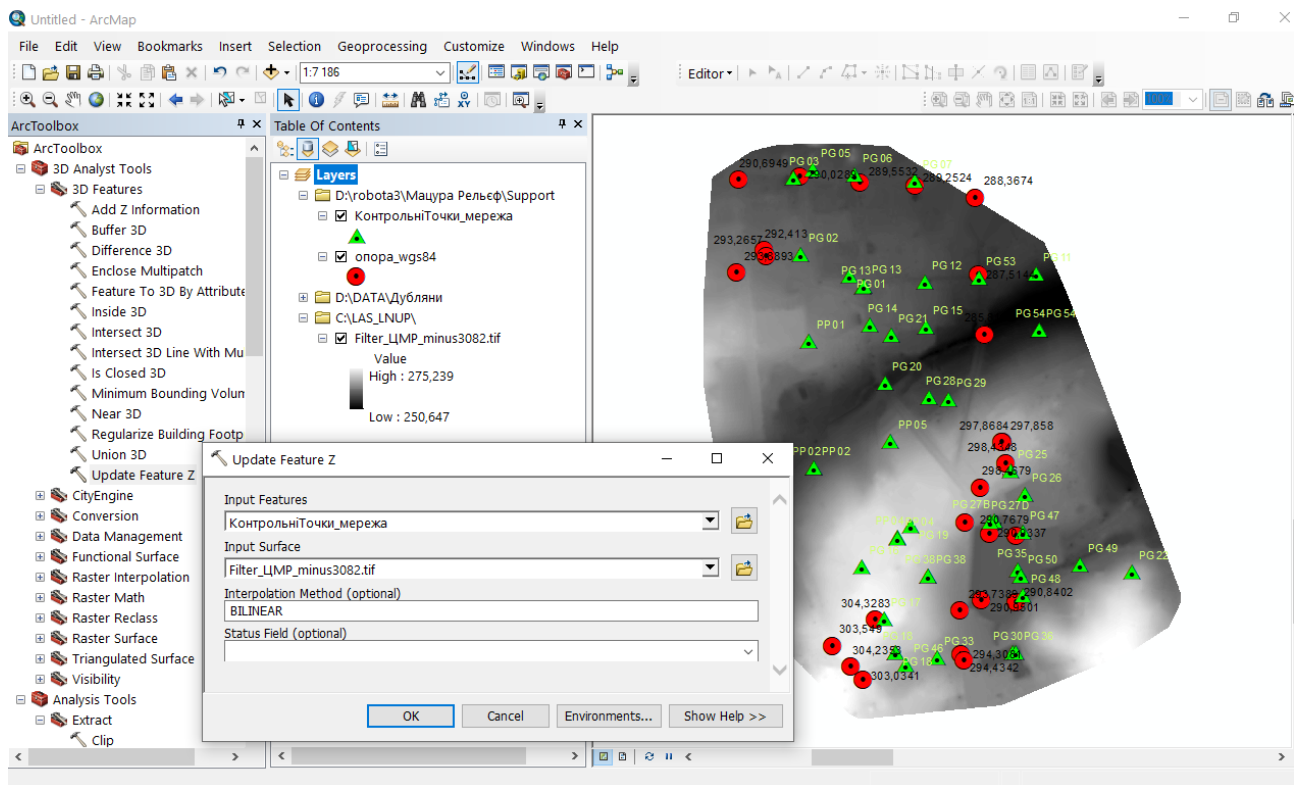


Рис.3. 13. Присвоєння контрольним точкам значень висот з растрової ЦМР.

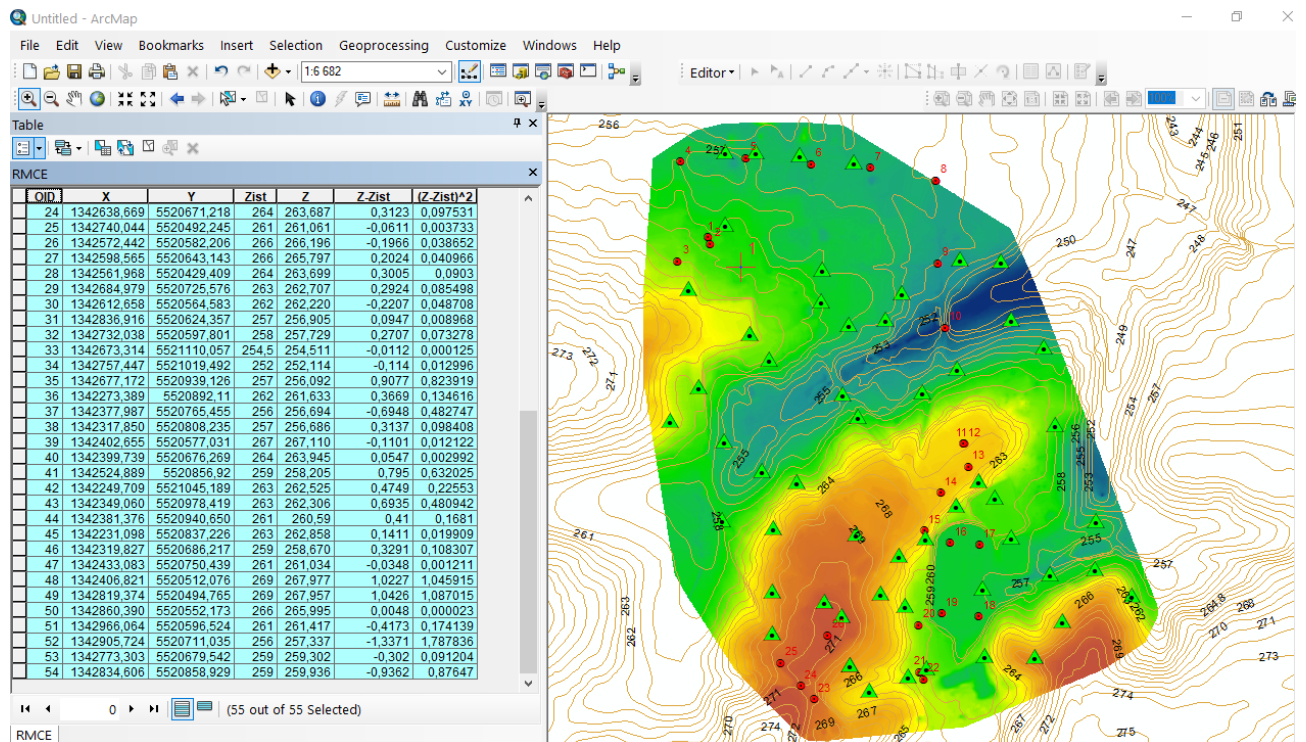
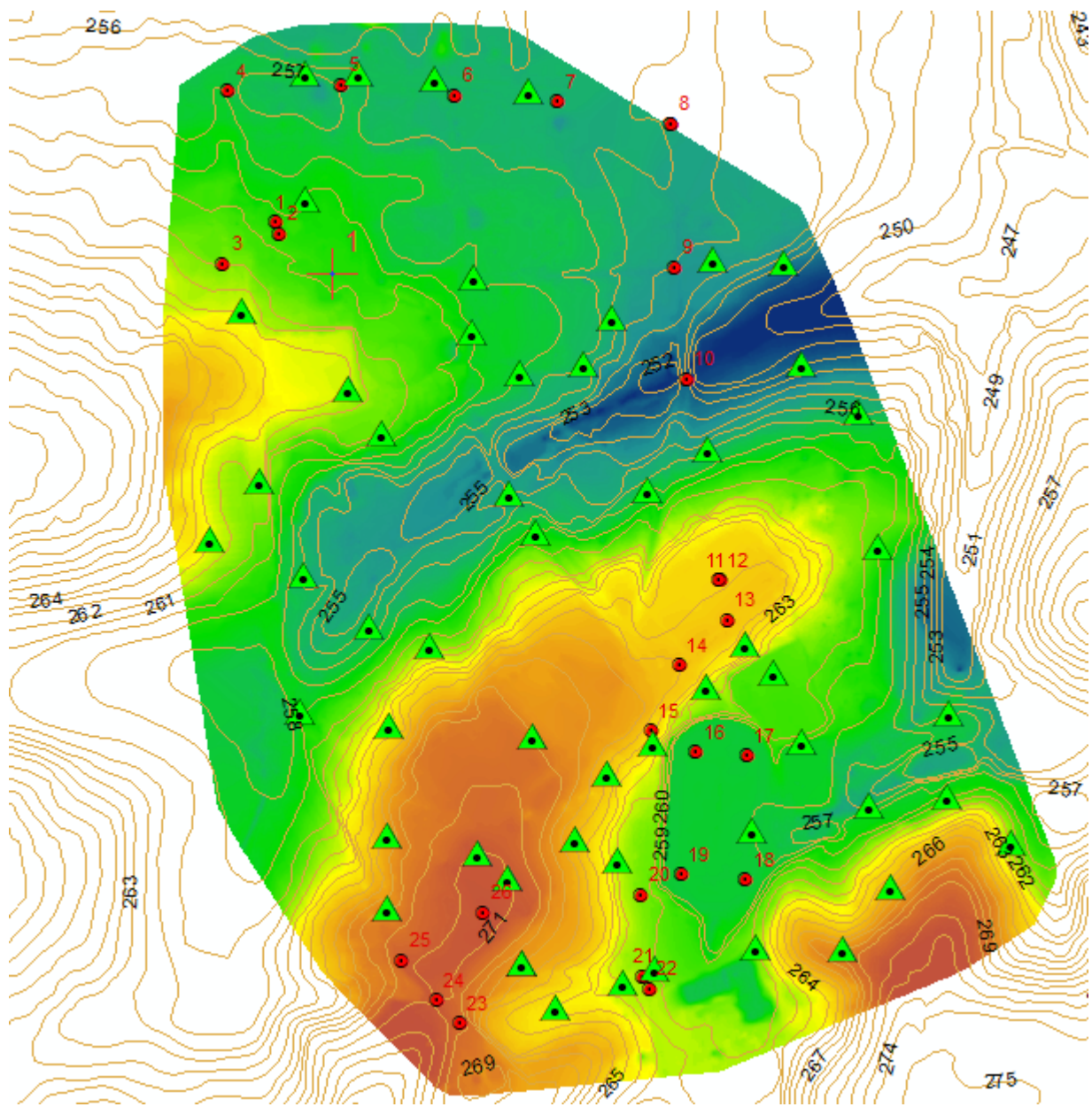


Рис.3. 14. Оцінювана растрова ЦМР, Карта горизонталей на якій створено 55 контрольних точок.

Атрибутивна таблиця шару контрольних точок містить поля Z_{ist} (еталонні висоти точок, взяті з великомасштабного плану), Z (висоти в цих точках, інтерпольовані з досліджуваної растрової ЦМР) а також поля для розрахунку різниць та квадратів різниць цих висот в кожній точці. Розрахунок середньої квадратичної помилки визначення висот точок створеної ЦМР виконуємо за формулою:

$$m_z = \pm \sqrt{\frac{(Z_{ист} - Z)^2}{n}}$$

де n – кількість контрольних точок, Z_{ist} – еталонні висоти точок, взяті з великомасштабного плану, Z – висоти точок досліджуваної ЦМР.



- Layers
 - D:\robot3\Мацура Рельєф\Support
 - КонтрольніТочки_мережа
 - опора_wgs84
 - D\DATA\Дубляни
 - 307Горизонталідодаткові
 - 307Горизонталіосновні
 - 307Горизонталіпотовщені
 - C:\LAS_LNUP\
 - Filter_ЦМР_minus3082_minus220.tif
- Value
- High : 273,039
- Low : 248,447

Рис.3. 15. Набір даних для оцінки точності створеної ЦМР.

Таблиця 3.3. - Атрибутивна таблиця шару «Контрольні Точки» з даними для розрахунку середньої квадратичної помилки визначення висот

FID	X	Y	Z _{ist}	Z	Z _{ist} -Z	(Z _{ist} -Z) ²
1342303,2169		5521148,1541	259,0000	258,8872	0,1128	0,01272384000
1342297,6304		5521261,3196	257,0000	257,1534	-0,1534	0,02353156000
1342345,7082		5521263,2756	257,0000	256,9264	0,0736	0,00541696000
1342414,0821		5521262,4319	256,5000	256,5902	-0,0902	0,00813604000
1342500,2522		5521255,0039	256,5000	256,2985	0,2015	0,04060225000
1342738,0919		5521109,8633	252,0000	253,2746	-1,2746	1,62460516000
1342585,2191		5521053,6189	256,0000	255,7670	0,2330	0,05428900000
1342457,7888		5521084,3698	258,0000	257,6661	0,3339	0,11148921000
1342459,3076		5521035,6032	259,0000	258,1586	0,8414	0,70795396000
1342561,0813		5521011,3875	257,0000	256,3841	0,6159	0,37933281000
1342485,4571		5520564,6855	271,0000	271,0241	-0,0241	0,00058081000
1342513,3039		5520544,7134	271,0000	270,8327	0,1673	0,02798929000
1342530,9615		5520468,1338	268,0000	267,6699	0,3301	0,10896601000
1342530,9575		5520468,1258	268,0000	267,6697	0,3303	0,10909809000
1342530,0640		5520672,4346	269,0000	269,0087	-0,0087	0,00007569000
1342499,4973		5520891,3297	256,0000	255,1022	0,8978	0,80604484000
1342503,6047		5521000,9853	258,0000	257,6901	0,3099	0,09603801000
1342906,7954		5520635,8503	259,0000	259,2786	-0,2786	0,07761796000
1342717,9400		5520765,1172	264,0000	263,9246	0,0754	0,00568516000
1342744,4326		5520741,0689	260,5000	260,1352	0,3648	0,13307904000
1342811,3475		5520979,2448	256,0000	256,6350	-0,6350	0,40322500000
1342624,5498		5520899,5532	258,0000	257,7705	0,2295	0,05267025000
1342649,9604		5520468,2530	261,0000	260,8468	0,1532	0,02347024000
1342622,3488		5520453,8205	262,0000	262,2219	-0,2219	0,04923961000
1342638,6698		5520671,2186	264,0000	263,6877	0,3123	0,09753129000
1342740,0449		5520492,2459	261,0000	261,0611	-0,0611	0,00373321000
1342572,4420		5520582,2068	266,0000	266,1966	-0,1966	0,03865156000
1342598,5651		5520643,1432	266,0000	265,7976	0,2024	0,04096576000
1342561,9681		5520429,4094	264,0000	263,6995	0,3005	0,09030025000
1342684,9798		5520725,5760	263,0000	262,7076	0,2924	0,08549776000
1342612,6582		5520564,5837	262,0000	262,2207	-0,2207	0,04870849000
1342836,9168		5520624,3573	257,0000	256,9053	0,0947	0,00896809000
1342732,0389		5520597,8018	258,0000	257,7293	0,2707	0,07327849000
1342673,3149		5521110,0570	254,5000	254,5112	-0,0112	0,00012544000
1342757,4475		5521019,4924	252,0000	252,1140	-0,1140	0,01299600000
1342677,1725		5520939,1261	257,0000	256,0923	0,9077	0,82391929000
1342273,3892		5520892,1100	262,0000	261,6331	0,3669	0,13461561000
1342377,9874		5520765,4559	256,0000	256,6948	-0,6948	0,48274704000
1342317,8501		5520808,2355	257,0000	256,6863	0,3137	0,09840769000
1342402,6557		5520577,0318	267,0000	267,1101	-0,1101	0,01212201000
1342399,7398		5520676,2695	264,0000	263,9453	0,0547	0,00299209000
1342524,8894		5520856,9200	259,0000	258,2050	0,7950	0,63202500000
1342249,7099		5521045,1896	263,0000	262,5251	0,4749	0,22553001000
1342349,0601		5520978,4199	263,0000	262,3065	0,6935	0,48094225000
1342381,3765		5520940,6503	261,0000	260,5900	0,4100	0,1681

1342231,0982	5520837,2265	263,0000	262,8589	0,1411	0,01990921000
1342319,8276	5520686,2177	259,0000	258,6709	0,3291	0,10830681000
1342433,0837	5520750,4395	261,0000	261,0348	-0,0348	0,00121104000
1342406,8215	5520512,0766	269,0000	267,9773	1,0227	1,04591529000
1342819,3746	5520494,7653	269,0000	267,9574	1,0426	1,08701476000
1342860,3904	5520552,1732	266,0000	265,9952	0,0048	0,00002304000
1342966,0647	5520596,5241	261,0000	261,4173	-0,4173	0,17413929000
1342905,7243	5520711,0359	256,0000	257,3371	-1,3371	1,78783641000
1342773,3030	5520679,5425	259,0000	259,3020	-0,3020	0,09120400000
1342834,6066	5520858,9298	259,0000	259,9362	-0,9362	0,87647044000

Статистичну оцінку розподілу помилок на контрольних точках показують таблиця і гістограма на наступному рисунку:

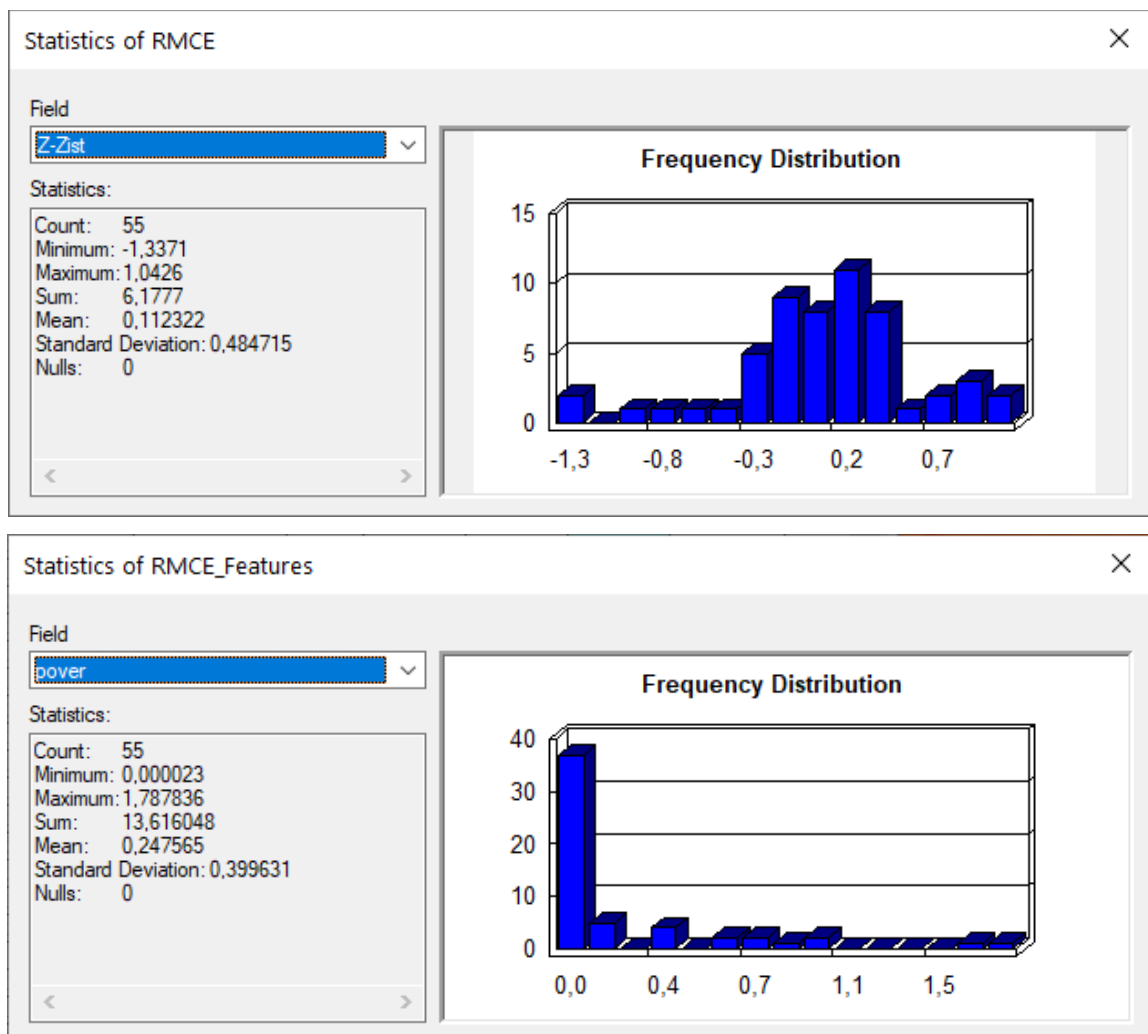


Рис.3. 16. Статистична оцінка розподілу помилок визначення координат Z на контрольних точках: Оцінка різниць висот та квадратів різниць висот.

Середнє значення різниць висот ЦМР і контрольних точок (систематична помилка) - 0,11 м; середня квадратична помилка – 0,49 м. Мінімальне і максимальне значення різниць висот склало -1,34 м та +1,04 м.

Отримані значення точності створеної ЦМР дозволяють стверджувати, що автоматичні алгоритми задовільняють потребам створення ортофотопланів, але не в повній мірі гарантують отримання карти горизонталей з перетином рельєфу 1 м. Щоб отримати DEM із хмари її точок потрібно відфільтрувати, щоб видалити всі точки, які розташовані над земною поверхнею. Більшість доступних пакетів програмного забезпечення досягають цього за допомогою алгоритмів, які виконують класифікацію хмари точок. Результати часто незадовільні, що призводить до помилок DEM. Рішенням є доопрацювання створених моделей людиною-оператором.

Будь-який рівень зеленого покриття - трава, листя на деревах і кущах сильно спотворюють модель рельєфу і обмежують доцільність аерознімання з БПЛА як методу отримання вхідної інформації для картографування в масштабах 1:500 і 1:1000 і навпаки при умові ретельного планування та доповнення даних матеріалами наземних знімань (тахеометр, супутниковий приймач) можуть застосовуватись для зйомок в масштабах М 1:2000, 1:5000 і менших.

4. Застосування безпілотників для охорони довкілля

Однією з найбільш популярних областей застосування дронів є збір екологічних даних. БПЛА використовуються для здійснення екологічного контролю (нагляду). Безпілотники, які використовуються в екологічних дослідженнях, прийнято називати "еко-дронами". Переваги: можуть бути ближче до об'єкта, що досліджується, на відміну від літаків або супутників, можуть взаємодіяти з навколишнім середовищем, працювати в будь-який час доби. Безпілотні літальні апарати можуть брати проби повітря та води, виявити ерозію ґрунту, відстежити зміни в стані рослинного покриву, виконати пошук несправностей в інфраструктурі потенційно небезпечних підприємств, які можуть становити загрозу для навколишнього середовища, причому вони зможуть зробити це набагато точніше, безпечніше і швидше, ніж відвідання небезпечних територій людиною і застосуванням будь-яких технічних засобів.

Більшість прикладів професійного застосування дронів в екології - це безпечні аудити та інспекції. Традиційний спосіб проведення аудиту виробничої території завжди пов'язаний із ризиком виникнення небезпек. У багатьох випадках дрони можуть легко та ефективно отримувати доступ до важкодоступних місць, об'єктів, розташованих на великій висоті та потенційно токсичних областях, тим самим знижуючи вплив на співробітників потенційних ризиків. Безпека експертів та клієнтів має першорядне значення у всьому, що ми робимо. Використовуючи автоматизовані безпілотники, ми можемо забезпечити безпеку своїх співробітників та персоналу клієнта.

Дрони, оснащені датчиком, можуть вимірювати та передавати інформацію про викиди, прокладаючи свій маршрут поблизу заводських труб або інших важкодоступних промислових зон. Інакше таке завдання зажадало б встановлення будівельних риштувань або використання стріли крана, що підвищило б ризик для інспекторів.

Дрони ефективні щодо оцінок великих виробничих площ.

Використання безпілотників забезпечує максимально безпечне робоче середовище для своїх співробітників та клієнтів завдяки використанню дронів для огляду небезпечних та важкодоступних місць і тим самим сприяє збиранню більш точних даних безпечним та ефективним способом.

В пресі повідомляється про застосування БПЛА в екологічних проектах глобального та місцевого рівня.

В рамках проекту NASA ATTREX військові розвідувальні дрони Global Hawk задіявались для вимірювання вологи, концентрації озону та інших параметрів стратосфери для виявлення глобальних змін в земній атмосфері. Безпілотники швейцарської компанії senseFly застосовуються для пластиком.

На місцевому рівні у рамках боротьби із забрудненням атмосфери влада та громадські організації стали використовувати дрони, які відстежують нелегальні викиди на кар'єрах гірничодобувних підприємств у нічний час, для моніторингу забруднення повітря над електростанціями, очисними заводами та іншими потенційними порушниками.

Типовим прикладом БПЛА-платформи для екологічного застосування є платформа DJI Matrice 300 RTK з газоаналізатором Sniffer4D V2.0, змінними модулями для виявлення різних газів і програмним забезпеченням. Цей пристрій забезпечує можливість вимірювання концентрації широкого спектра газів на висотах до 500 метрів і картографування забруднень атмосфери. Платформа застосовується для планових моніторингових досліджень та для відбору проб в місцях природних і техногенних подій. Sniffer 4D V2 2.0 здатен розпізнавати до 9 видів газів за 1 політ. Користувачі можуть змінювати конфігурацію датчиків у відповідності з потребами і бюджетом. Виявляють такі гази: PM2.5 ,PM10, SO2, CO, NO2, O2, O3 ,VOCs, LEL / CH4, CO2, H2S, NH3, HCl, H2, Cl2, PH3.

На Львівщині відомі декілька прикладів застосування БПЛА для екологічного моніторингу.

За сприяння Freedom House та Міністерства закордонних справ Норвегії виконувався проект "Дрон-погляд на зони екологічного лиха Львівщини", у рамках якого вконувались наукові дослідження, що пов'язані з вивченням

екологічних проблем гірничопромислових територій Львівщини. На Львівщині близько 2,6 % площі області охоплено гірничодобувною діяльністю. Відвали, кар'єри, хвостосховища, відстійники і водосховища займають 1,6 % території. Підтоплено і заболочено – 0,4 %, просіданням і карстом вражено 0,6 %. Забруднених земель на Львівщині налічується 0,13 тис. кв. км, а повністю знищених ґрунтів – 0,02 тис. кв. км. Дослідження стосувались гірничодобувних районів Сокальщини та нафтодобувних – в м.Борислав.

Другим прикладом є дослідження наслідків виведення з експлуатації та рекультивації львівського міського сміттєзвалища. Аерознімання з БПЛА тут використовували фахівці Львівської міськради, Університету ім. Івана Франка та Львівської політехніки. Визначались площі, об'єми накопичених мас та гудронних озер. Гудрони накопичено ВАТ "Львівський дослідний нафтомаслозавод" протягом 70-80 років минулого століття в об'ємі понад 200 тис. м³ кислих гудронів. Кислі гудрони – це речовини другого класу небезпеки після радіоактивних відходів. Саме такий тип гудронів захоронено в неналежних умовах на території Грибовицького сміттєзвалища. Збірники утворені греблями, побудованими в ярах, на земельній ділянці загальною площею 6,8 га, з яких 2,0 га належить ЛКП "Збиранка", решта земельної ділянки використовується без правовстановлюючих документів. Загальна площа збірників орієнтовно 30 тис. кв. м.

Важливою для екології є освіта та підвищення загальної обізнаності. Як просвітницька діяльність відомі кілька громадських ініціатив, в яких застосовувались БПЛА, зокрема створена «Мапа дрон-відео Львова». Проект "Дрон-погляд на зони екологічного лиха Львівщини" покликаний активізувати зусилля місцевої влади, громадськості та журналістів регіону на вирішення екологічних проблем, які є джерелами соціальної напруги і які перешкоджають інтеграції до ЄС.

5. Світовий досвід створення правових умов для безпечного застосування безпілотних літальних апаратів.

Національна та міжнародна авіаційна влада веде розробку нормативно-правових вимог, які дозволять гарантувати безпеку використання цивільних дронів. Крім того, важливу роль у цьому процесі мають відіграти страхові компанії. Їхнє завдання – оформляти поліси, що захищають операторів дронів та компанії від шкоди та цивільної відповідальності. У наведеній нижче таблиці наводиться опис існуючої на даний момент нормативно-правової бази в деяких країнах. Більшість країн ще тільки має розробити закони, що гарантують сприятливе для бізнесу нормативно-правове середовище.

Таблиця 5.1. Умови застосування БПЛА в різних країнах (за дослідженням PwC)

Країна	Можливість комерційних польотів	Обов'язкова ліцензія на здійснення польотів	Допустимість виконання польотів за межами прямої видимості	Обов'язкова ліцензія на польоти за межами прямої видимості оператора	Обов'язкове страхування комерційних польотів	Обов'язкове навчання пілотів для отримання ліцензії
Польща	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Велико-бриганія	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Китай	✓	✓	✓	✗	✓	✓
Канада	✓	✓	✓	✗	✓	✗
Німеччина	✓	✓	✗	✗	✓	✗
США	✓	✓	✗	✗	✗	✗

Однією із складових надійної системи контролю є обов'язкова реєстрація дронів та розробка комплексної системи управління повітряним рухом для безпілотних літальних апаратів, призначеної для запобігання зіткненню дронів з іншими об'єктами. Ці системи повинні бути спроектовані таким чином, щоб давати безпілотним літальним апаратам можливість бачити інші літальні апарати та потенційні перешкоди та уникати зіткнення з ними.

Польоти БПЛА регулюються законодавством у галузі пілотованої та безпілотної авіації, що визначає основні правила використання безпілотників у повітряному просторі. Нормативна база у більшості країн проводить розмежування між використанням безпілотних літальних апаратів у рекреаційних та комерційних цілях. При цьому повністю розробленої нормативної бази враховується час доби, вага літального апарату, зона і висота польоту. Спеціальний дозвіл завжди потрібен для польотів над територією аеропортів і в безпосередній близькості до них, над військовими та основними цивільними об'єктами (офісами державних установ), над густонаселеними ділянками та в інших зонах, на які поширюються обмеження доступу. У деяких країнах потрібна реєстрація безпілотного літального апарату до початку його використання. Як правило, дозволи чи ліцензії від управління цивільної авіації не потрібні для польотів малогабаритних безпілотних літальних апаратів у рекреаційних цілях. Проте в США, наприклад, необхідно реєструвати безпілотний літальний апарат вагою від 250 грам до 25 кг перед першим влітом, навіть коли вони використовуються в рекреаційних цілях. У більшості країн права на управління безпілотними літальними апаратами в комерційних цілях є лише у сертифікованих пілотів, на їх використання накладаються серйозніші обмеження, особливо в населених пунктах. У деяких країнах для отримання дозволу потрібне надання технічних параметрів безпілотного літального апарату та плану польоту з детальним описом методів забезпечення безпеки польоту та порядку виконання аварійної посадки у разі потреби. До вимог може входити призначення пілота (командира літального апарату, що відповідає за безпеку польоту) та спостерігача, особливо при здійсненні вильотів за межами прямої видимості.

Окремі нормативні вимоги встановлюються для персоналу, який бере участь у управлінні безпілотними літальними апаратами. До таких норм і правил входять всі види обов'язкових або рекомендованих курсів навчання, сертифікатів та дозволів, необхідних для управління безпілотними літальними апаратами. У більшості країн від любителів безпілотників не потрібно отримання будь-яких

ліцензій або проходження спеціального навчання для управління власним малогабаритним БПЛА з некомерційною метою. Проте практично всі локальні органи нагляду вимагають надання спеціальних ліцензій пілотів, сертифікатів та дозволів на використання БПЛА у комерційних цілях. Для їх отримання операторам безпілотних літальних апаратів необхідно скласти теоретичні та практичні іспити, пройти медичний огляд.

Наприклад, у Польщі оператори БПЛА зобов'язані скласти теоретичні та практичні іспити, організовані Управлінням цивільної авіації, а також мати дійсну довідку про проходження медичного обстеження та поліс страхування цивільної відповідальності. Особи, які керують БПЛА, можуть отримувати два види ліцензій: • оператор безпілотних літальних апаратів у межах прямої видимості (UAVO VLOS); • оператор безпілотних літальних апаратів за межами прямої видимості (UAVO BVLOS). На даний момент навчання необхідне лише для отримання ліцензії на керування безпілотними літальними апаратами за межами прямої видимості. Тривалість курсу навчання становить від 4 до 10 днів.

Остання сфера законодавчого регулювання стосується рекомендацій для страхування та правил, що встановлюють вимоги до обов'язкового та добровільного страхування. Користувачі дронів повинні мати страхування на випадок фізичної втрати апарату, а також страхування відповідальності користувача за заподіяння шкоди третім особам та відповідальності виробника за якість та безпеку продукції. У кількох країнах (Канада, Китай, Німеччина, Польща та Великобританія) страхування відповідальності перед третіми особами (за заподіяння матеріальних збитків майну або заподіяння травм) є обов'язковою умовою для використання безпілотних літальних апаратів. Два останні види страховки захищають користувачів безпілотних літальних апаратів від відповідальності за нещасних випадків із заподіянням травм третім особам та матеріальних збитків майну третіх осіб внаслідок поломки або неконтрольованого зниження безпілотного пристрою.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

В магістерській кваліфікаційній роботі дано аналіз теоретичних положень щодо створення моделі рельєфу локального рівня за матеріалами акрознімання з безпілотних літальних апаратів. Досліджено методику цифрового моделювання території Львівського національного університету природокористування для дослідження умов формування поверхневого стоку.

Отримана в результаті виконання експериментальної роботи оцінка точності створеної цифрової моделі рельєфу (ЦМР) дозволяє стверджувати, що автоматичні алгоритми фотограмметричного опрацювання задовільняють потребам створення ортофотопланів, але не в повній мірі гарантують отримання карти горизонталей з перетином рельєфу 1м. Середнє значення різниць висот ЦМР і контрольних точок (систематична помилка) - 0,11 м; середня квадратична помилка – 0,49 м.

Щоб отримати ЦМР із хмари точок її потрібно відфільтрувати та видалити всі точки, які розташовані над земною поверхнею. Більшість доступних пакетів програмного забезпечення досягають цього за допомогою алгоритмів, які виконують класифікацію хмари точок. Результати цього процесу часто незадовільні, що призводить до помилкових значень висот вузлів цифрової моделі рельєфу. Рішенням є доопрацювання створених моделей людиною-оператором.

Однак ЦМР на основі знімків БПЛА не завжди можна застосовувати для моделювання рельєфу лісистих територій. Причиною є виникнення артефактів через помилки автоматизованої класифікації хмари точок.

Також слід відмітити необхідність ретельного вибору налаштувань програми автоматичного фотограмметричного опрацювання щодо забезпечення отримання максимально точного перерахунку планових координат та висот із світових систем, в яких виконується навігаційне забезпечення БПЛА і системою координат і відліку висот опорної наземної

мережі. Аналіз показує, що в Україні практично застосовують різні моделі геоїдів і відповідно такий перехід не завжди є однозначним.

Створено цифровий картографічний шар водонепроникних поверхонь на досліджуваній території, який необхідний для оцінки умов формування стоку.

Дано пропозиції з охорони праці при виконанні аерознімання з безпілотних літальних апаратів та охорони навколишнього середовища.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Анпілова Є.С. Інформаційні технології для управління екологічною безпекою поверхневих вод: Монографія.–К.:«Азимут-Україна». –2013.–104с.
2. Буднік С.В. Зливовий стік зі схилів. Монографія. - Житомир,- 2007.- 184с.
3. Водний кодекс України. Стаття 1: Визначення основних термінів. : https://urst.com.ua/vodnyi_kodeks/st-1
4. Даник Ю.Г., Катеринчук І.С., Балицький І.І. Методика забезпечення безпеки застосування БПЛА при виконанні спеціальних задач в складних умовах. Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони № 3 (30)/2017. С.116-125
5. Держгеокадастр розпочинає впровадження використання на території України Європейської вертикальної референцної системи – European Vertical Reference System (EVRS). <https://land.gov.ua/derzhgeokadastr-rozpochynaye-vprovadzhennya-vykorystannya-na-terytoriyi-ukrayiny-yevropejskoyi-vertikalnoyi-referencznoyi-systemy-european-vertical-reference-system-evrs/>
6. Дослідження самоорганізації флювального рельєфу на засадах синергетичної парадигми сучасного природознавства: монографія / Костріков С.В., Черваньов І.Г. – Х.: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2010. – 144с
7. ДСТУ 3013-95. Гідросфера. Правила контролю за відведенням дощових і снігових стічних вод з територій міст і промислових підприємств. – Київ, Держстандарт України, 1995. – 14 с.
8. Зацерковний В.І. Геоінформаційні системи і бази даних: Монографія. Кн. 2 / В.І. Зацерковний, В.Г. Бурачек, О.О. Железняк, А.О. Терещенко. – Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2017. – 237 с.]
9. Романенко В.Д. Основи гідроекології. – К.: Генеза, 2004. – 664 с.
10. Кабінет міністрів України. Постанова від 09 червня 2023 р. № 590 Київ. Деякі питання використання Європейської вертикальної референцної

системи (EVRS). <https://www.kmu.gov.ua/npas/deiaki-pytannia-vykorystannia-ievropeiskoi-vertykalnoi-referentsnoi-systemy-t090623>

11. Канал Яричівський / Є. А. Іванов, І. П. Ковальчук // Енциклопедія Сучасної України [Електронний ресурс] / Редкол. : І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк [та ін.] ; НАН України, НТШ. – К. : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2012. – Режим доступу : <https://esu.com.ua/article-9251>.
12. Лаврик В. І., Боголюбов В. М. Методи оцінки й управління поверхневим стоком урбанізованих територій. Києво-Могилянська академія. Наукові записки. Том 22. Природничі науки. -2003. с.416-419
13. Львівська область: природні умови та ресурси: монографія / за заг. ред. д-ра геогр. наук, проф. М.М. Назарука. — Львів: Видавництво Старого Лева, 2018. — 592 с.
14. Львівський національний аграрний університет: від витоків до сучасності (1856—2016) біографічний довідник. /За загальною редакцією професора, академіка НААН України В. В. Снітинського. — Львів: Ліга-Прес, 2016. — 419 с.
15. Мацура Б. Методика збору геоданих для моделювання поверхневого стоку на території академічного містечка львівського національного університету природокористування. Студентська молодь і науковий прогрес: тези доп. Міжнар. студ. наук. форуму, 4 – 6 жовт. 2023 р. [Електронний ресурс]. Львів, 2023. С.187
16. Порядок топографічної зйомки у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 (Проект). <https://land.gov.ua/wp-content/uploads/2021/12/%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B5%D0%BA%D1%82.pdf>
17. Процик М. Т. Методи фотограмметричного та картографічного супроводу багаторівневої системи моніторингу ерозійних ґрунтових процесів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. Наук / М. Т. Процик. – Львів, 2012. – 24 с.]

- 18.Словник – довідник з екології: Навчально-методичний посібник/ О. Г. Лановенко, О. О. Остапішина. – Херсон: ПП Вишемирський, 2013.–226 с.
- 19.Стандартизація у сфері топографо-геодезичної та картографічної діяльності. База топографічних даних: Правила цифрового опису рельєфу. СОУ 71.12 - 37 – 948:2014. - Київ Мінагрополітики України 2014, -43с.
- 20.Barnali Dixon and Venkatesh Uddameri. GIS and geocomputation for water resource science and engineering. John Wiley & Sons, Ltd., 2016. -1095p.
- 21.Jeff Oppong. How to Use ArcGIS Pro to Map Watersheds. Spatial analysis. September 13, 2023. https://www.gislounge.com/arcgis-pro-map-watersheds/?utm_medium=email&utm_campaign=GISNL-2023-Sep-14&utm_source=YMLP
- 22.Kardifiva E., Batrak G. Drain net modeling for urban territories with GIS. ArvReView. – 2017. №3 (82)
- 23.Popescu D, Ichim L, Stoican F. Unmanned Aerial Vehicle Systems for Remote Estimation of Flooded Areas Based on Complex Image Processing. Sensors. 2017; 17(3):446. <https://doi.org/10.3390/s17030446>
- 24.Rock G., Ries J., Udelhoven T. (2012). Sensitivity analysis of UAV-photogrammetry for creating digital elevation models (DEM). International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 38. 69-73.
- 25.Sentinel-2 10m Land Use/Land Cover Timeseries Downloader. <https://www.arcgis.com/apps/instant/media/index.html?appid=fc92d38533d440078f17678ebc20e8e2>
- 26.Snitynskyi V., Khirivskyi P., Hnativ I., Yakhno O., Hnativ R. The importance of protecting the area from flooding and floods in the foothills of the Carpathian rivers. Monograph Heritage of european science: medicine, chemistry, biology, ecology, agriculture. Book 1. Part 4. Karlsruhe 2020. P. 131-137. doi.org/10.30888/978-3-9821783-6-3.2020-01-04-016