

Національний університет «Львівська політехніка»
Міністерство освіти і науки України

МАРУСАЖ ХРИСТИНА ІВАНІВНА



УДК 528.71, 528.72

**РОЗРОБКА МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ
ЗМІН ПОВЕРХНЕВИХ ОБ'ЄМІВ ОСТРІВНИХ ЛЬОДОВИКІВ
АНТАРКТИЧНОГО УЗБЕРЕЖЖЯ**

05.24.01 – геодезія, фотограмметрія та картографія

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів, 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті «Львівська політехніка»
Міністерства освіти і науки України

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор
Глотов Володимир Миколайович,
Національний університет «Львівська політехніка», завідувач
кафедри фотограмметрії та геоінформатики

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Рудий Роман Михайлович,
Уманський національний університет садівництва, професор
кафедри геодезії, картографії і кадастру;

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Пащетник Олеся Дмитрівна,
Науковий центр Сухопутних військ Національної академії
сухопутних військ імені гетьмана Петра Сагайдачного,
провідний науковий співробітник науково-дослідного відділу
(систем управління військами).

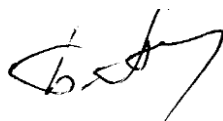
Захист відбудеться «14» травня 2021 р. о 10.00 годині на засіданні
спеціалізованої вченої ради Д 35.052.12 у Національному університеті «Львівська
політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Карпінського, 6, ауд. 502 II навч.
корп.

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного
університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів,
вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий «12» квітня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

к.т.н., доцент



Паляниця Б.Б.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Обґрунтування вибору теми дослідження. Процеси, що відбуваються в атмосфері, кріосфері та гідросфері, пов'язані з процесами в інших частинах планети і впливають на глобальний клімат. Домінантним чинником на зміни клімату є діяльність людини, і саме цей чинник є основною причиною потепління, яке спостерігають протягом останніх 50 років. Крім того, в кліматичній системі існує безліч механізмів зворотного зв'язку, які можуть підсилити або ж послабити ефекти цих змін. Одним з основних складових чинників кліматичної системи Землі є Антарктида, так як її льодовиковий покрив є чутливим до атмосферних і океанічних впливів, що дозволяє глибше вивчати ці процеси і створювати уточнені прогностичні моделі.

Вплив льодовиків на географічну оболонку Землі виявляється у зміні клімату планети, піднятті рівня Світового океану й затопленні прибережних територій та позначається на сферах економіки та життєдіяльності суспільства.

Особливо відчутно реагують на зміну температури острівні льодовики, які наче «лакмусовий папір» сприяють об'єктивним прогнозам щодо зміни клімату не тільки у даному регіоні, а й на поверхні всієї планети. Спостереження за динамікою льодовиків Антарктиди дасть змогу виявити кліматичні, гляціологічні та біологічні зміни, що відбуваються. Тому моніторинг льодовиків, зокрема, антарктичного узбережжя та острівних льодовиків в наш час є надзвичайно актуальним.

Для задач моніторингу острівних льодовиків антарктичного узбережжя та їх виходів здебільшого застосовують наземні методи дистанційного зондування, серед яких виділяють наземне цифрове знімання (НЦЗ) та наземне лазерне сканування (НЛС). Проте досі залишаються невирішеними питання щодо комплексного застосування цих методів.

В процесі виконання дисертаційних досліджень враховано досвід провідних вітчизняних та зарубіжних учених. У розвиток наземного фототеодолітного знімання відзначено вагомий внесок таких вітчизняних та зарубіжних вчених, як: О.Л. Дорожинський, В.М. Глотов, Ю.Ф. Книжников, М.Ю. Нікітін, Р.М. Рудий, К. Kraus, Т. Luhmann, W. Förstner, V. Kaufmann, R. Ladstädter, R. Bosch. Дослідженням методу наземного лазерного сканування займалися Р. В. Шульц, К. Р. Третьак, В. Д. Сидоренко, В. А. Середович, Y. Reshetyuk, T. Schulz, D. Lichti, R. Staiger, N. Pfeifer, R. Lindenbergh, R. Dietrich, J. Shan, K. Tan, X. Cheng та інші.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація відповідає науковому напрямку кафедри фотограмметрії та геоінформатики та виконана в межах науково-дослідної роботи кафедри «Методи, моделі і технології моніторингу стану довкілля та окремих об'єктів засобами фотограмметрії, дистанційного зондування та геоінформатики» (державна реєстрація №0118U001548), науково-технічної роботи «Створення комплексного геофізичного та геодезичного полігону в районі станції «Академік Вернадський» з використанням глобальних навігаційних супутникових систем і методів дистанційного зондування» за замовленням Державної установи Національний антарктичний науковий центр МОН України (державна реєстрація №0115U006716) за Державною цільовою науково-технічною програмою проведення досліджень в Антарктиці на 2011-2020

роки та науково-дослідної роботи «Дослідження змін поверхневих об'ємів острівних та материкових льодовиків за результатами цифрових зображень, лазерного сканування та геодезичних вимірювань, виконаних під час сезону у 24-й Українській антарктичній експедиції 2019–2020 рр.» за договором № 5-01/19 від 01 серпня 2019 р. з Державною установою Національний антарктичний науковий центр Міністерства освіти і науки України.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є розроблення методики комплексного дослідження змін поверхневих об'ємів острівних льодовиків антарктичного узбережжя за результатами наземного лазерного сканування та наземного цифрового знімання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Проаналізувати сучасні методи дослідження льодовиків та опрацювати класифікацію методів.
2. Розробити способи визначення фокусної віддалі для неметричних цифрових знімальних камер.
3. Розробити методику визначення змін поверхневих об'ємів острівних льодовиків антарктичного узбережжя за результатами наземного лазерного сканування та цифрового знімання.
4. Опрацювати алгоритми оптимізації інтервалу сітки цифрової моделі рельєфу для визначення змін об'єму льодовиків та пошуку мертвих зон за даними наземного лазерного сканування.
5. Дослідити зміни поверхневих об'ємів острівних льодовиків на о. Вінтер та о. Галіндез упродовж 2013-2014, 2014-2018 років.

Об'єктом дослідження є зміни поверхневих об'ємів острівних льодовиків антарктичного узбережжя.

Предметом дослідження є методика комплексного застосування наземного лазерного сканування та цифрового стереофотограмметричного знімання для визначення змін поверхневих об'ємів острівних льодовиків.

Методи досліджень. Для розв'язання комплексу завдань, які сформовано в дисертаційній роботі стосовно змін поверхневих об'ємів острівних льодовиків антарктичного узбережжя, застосовано загальнонаукові методи аналізу, синтезу та класифікації, метод математичного аналізу, диференціального числення та комп'ютерного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Уперше розроблено методику визначення змін поверхневих об'ємів острівних льодовиків антарктичного узбережжя за результатами комплексного застосування наземного лазерного сканування та цифрового знімання.
2. Розроблено нові способи визначення фокусної віддалі для цифрових неметричних знімальних камер, що дозволять підвищити точність визначення координат точок об'єкта без застосування номенклатурного обладнання.
3. Удосконалено алгоритм для виявлення «мертвих» зон наземного лазерного сканування з метою їх доповнення даними наземного цифрового знімання. Для побудови цифрових моделей поверхонь льодовиків запропоновано оптимізацію вибору інтервалу сітки.

4. Апробовано методику комплексного дослідження змін та проаналізовано результати визначення змін поверхневих об'ємів льодовиків упродовж 2013-2014, 2014-2018 років.

Практичне значення одержаних результатів. Основні теоретичні положення та результати досліджень дисертаційної роботи впроваджено та застосовано Державною установою Національний антарктичний науковий центр МОН України. Методика та результати досліджень можуть бути використані державними та приватними установами, підприємствами та організаціями в галузі гляціології, геодинаміки та метеорології, наприклад, Інститутом геофізики НАН України ім. С.І. Суботіна, Інститутом геологічних наук НАН України, Українським гідрометеорологічним інститутом НАН України.

Особистий внесок здобувача. Результати виконаної дисертаційної роботи, отримані автором, опубліковано одноосібно у [6]. У співавторстві автору належить [5] – аналіз методів наземного лазерного сканування та цифрового знімання; [3, 13] – розробка алгоритму оптимізації інтервалу сітки для побудови ЦМР, підвищення його точності та апробація; [1, 11, 18] – опрацювання матеріалів наземного лазерного сканування та цифрового знімання та аналіз результатів; [2, 7-10, 12, 14, 15] – розробка способів визначення фокусної віддалі та їх апробація; [4, 16] – дослідження точності побудови хмари точок та аналіз результатів; [17, 18] – аналіз досліджень льодовиків Антарктичного півострова, опрацювання матеріалів наземного лазерного сканування та цифрового знімання, аналіз результатів.

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення та результати наукових досліджень висвітлені та обговорені на VII Міжнародній науково-технічній конференції «Кадастр, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку», 13-15 червня 2013 р., м. Львів., XVIII Міжнародному науково-технічному симпозиумі «Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GNSS і GIS – технології», 10-15 вересня 2013 р. м. Алушта, АР Крим, XVIII Міжнародній науково-технічній конференції «Геофорум-2013». 24-26 квітня 2013 р., Львів-Яворів., XIX Міжнародній науково-технічній конференції «Геофорум-2014». 23-25 квітня 2014 р. Львів-Яворів., XX Міжнародній науково-технічній конференції «Геофорум-2015». 22-24 квітня 2015 р. Львів-Брюховичі-Яворів., XXI Міжнародній науково-технічній конференції «Геофорум-2016». 13-15 квітня 2016 р., Львів-Брюховичі. Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «GeoTerrace-2016», 15-17 грудня 2016 р., Львів., XXIV Міжнародній науково-технічній конференції «Геофорум-2019». 10-12 квітня 2019 р., Львів-Яворів-Брюховичі., IX Міжнародній Антарктичній конференції, присвяченій 60-річчю підписання Договору про Антарктику в ім'я миру та розвитку міжнародної співпраці, 14-16 травня 2019 р. м. Київ, Україна, World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium, 17-21 June 2019, Prague (Czech Republic)., 9th international scientific-technical conference “Environmental Engineering, Photogrammetry, Geoinformatics – Modern Technologies and Development Perspectives”, 17-20 September 2019, Lublin (Poland).

Публікації. Результати досліджень за темою дисертації оприлюднені в 18 публікаціях, з-посеред яких: 2 статті в наукових періодичних виданнях інших держав (Польща, Чехія), які включені до міжнародних наукометричних баз даних

Web of Science та Scopus; 2 статті в науковому фаховому виданні України, яке включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus; 4 статті в наукових фахових виданнях України; 2 патенти на корисну модель; 7 тез та матеріалів конференцій та 1 стаття в іншому науковому виданні України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація викладена на 139 сторінках і складається зі вступу, 4 розділів, висновків, списку літературних джерел із 239 позицій та 4 додатків. Робота містить 44 рисунки, 17 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання досліджень, висвітлено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, викладено відомості про апробацію роботи, повноту публікацій результатів та їх впровадження.

У **першому розділі** «Аналіз сучасних методів дослідження кількісних параметрів льодовиків» розглянуто процес формування льодовиків, подано сучасний стан досліджень льодовиків в антарктичному регіоні, проаналізовано методи моніторингу льодовиків та запропоновано їх класифікацію (рис. 1).



Рис. 1. Загальна класифікація методів дослідження льодовиків

На підставі аналізу понад 150 літературних джерел сформовано відповідні висновки щодо переваг та недоліків застосовуваних методів.

Контактні методи дослідження льодовиків є недостатньо технологічними, а з точки зору охорони праці, у більшості видів робіт небезпечними.

Методи дистанційного зондування, такі як авіаційне лазерне сканування, космічне та радарне знімання доцільніше застосовувати для визначення довгострокових змін великих за площею територій.

Метод аерознімання відповідає техніко-технологічним вимогам, проте, застосування в полярних регіонах має технологічні труднощі, що пов'язано з високою собівартістю робіт.

Застосування наземного лазерного сканування дозволяє отримати дані про поверхню льодовика в короткі терміни і підвищити точність отримання кількісних параметрів об'єктів дослідження, а тому є перспективним методом. Однак за використання лазерного сканування льодовиків залишаються «мертві» зони.

Для моніторингу змін острівних льодовикових поверхонь пріоритетним є комплексне застосування НЛС та НЦЗ. Це дозволить уникнути «мертвих» зон НЛС та підвищити точність визначення змін об'ємів льодовиків.

У **другому розділі** «Розробка способів визначення фокусної віддалі цифрової неметричної знімальної камери та дослідження наземного лазерного сканера» подано розроблені способи визначення фокусної віддалі цифрової неметричної знімальної камери (ЦНЗК), їх дослідження та апробацію. Досліджено та враховано вплив дисторсійних спотворень ЦНЗК. Подано дослідження точності побудови хмари точок методом наземного лазерного сканування залежно від відстані до об'єкта сканування та характеристик поверхні сканування.

Для визначення змін поверхневих об'ємів острівних льодовиків антарктичного узбережжя методом НЦЗ упродовж 2002-2005, 2013-2014, 2018-2019 років застосовували різні цифрові камери, які відрізняються об'єктивами, кількісними характеристиками ПЗЗ-матриць, особливостями конструкцій тощо. Виходячи з цього, виникла необхідність розробити способи, які б дозволили визначати фокусні віддалі об'єктивів не тільки цих камер, але тих, які застосовують сьогодні.

У дисертаційній роботі подано розрахунок граничної похибки визначення фокусної віддалі, для камери Canon 450D вона становить 8 мкм. Запропоновано три способи визначення фокусної віддалі, які дозволяють з розрахованою точністю отримувати координати точок об'єктів.

Технологічна реалізація **першого способу визначення фокусної віддалі ЦНЗК** подана на рис. 2 а: встановлюють ЦНЗК 1 та фрагмент контрольної сітки (КВС) 2, у безпосередній близькості від неї встановлюють дзеркало 3 так, щоб головний оптичний промінь 4 був перпендикулярний до дзеркала. Повертають ЦНЗК на кут вправо та вліво, виконують знімання в цих положеннях для отримання стереопари, а фокусну віддаль визначають за вимірними координатами точок на поверхні лінзи об'єктива ЦНЗК.

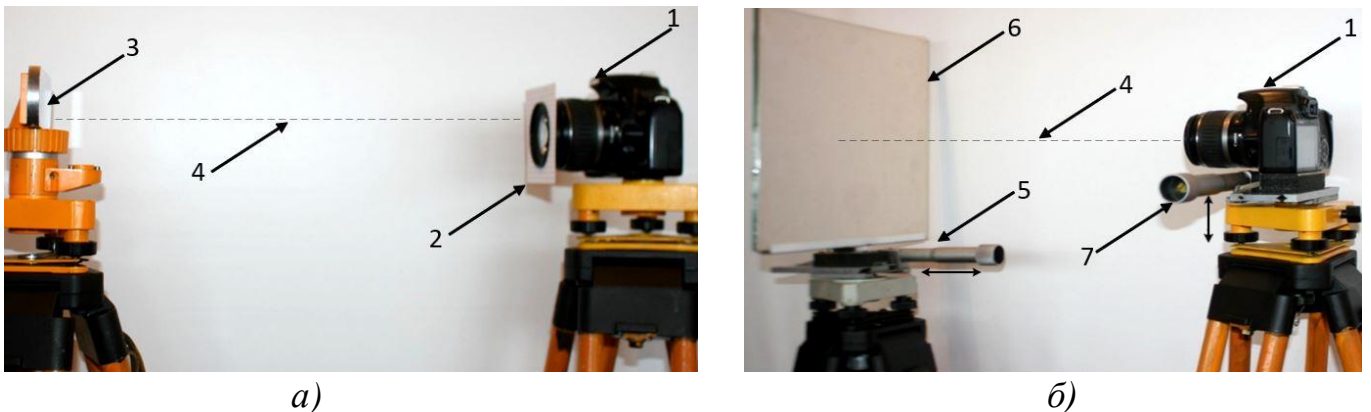


Рис. 2. Визначення фокусної віддалі: а) спосіб 1; б) способи 2 та 3:
1 – ЦНЗК, 2 – фрагмент КВС, 3 – дзеркало, 4 – головний оптичний промінь,
5, 7 – мікрометричний гвинт, 6 – КВС.

За основу способу **другого способу визначення фокусної віддалі ЦНЗК** взято спосіб вертикальної сітки визначення об'ємів. Технологічна реалізація подана на рис. 2 б. КВС 6 розташовують на деякій відстані від ЦНЗК 1 і виконують знімання КВС з лівої точки базису. Переміщують ЦНЗК вздовж базису знімання за допомогою мікрометричного гвинта 7 та виконують знімання КВС з правої точки базису. Переміщують КВС вздовж оптичної осі 4 на відстань, яку фіксують відліковим пристроєм 5 та повторно виконують знімання КВС з двох точок базису

знімання. На отриманих цифрових зображеннях вимірюють координати на відповідних перетинах КВС та визначають фокусну віддаль ЦНЗК.

Запропонований спосіб є пріоритетним для визначення фокусних віддалей ЦНЗК, які будуть застосовуватись для НЦЗ льодовиків та в подальшому визначенні змін їх об'ємів.

Технологічна реалізація *третього способу визначення фокусної віддалі ЦНЗК* подана на рис. 2 б. Встановлюють ЦНЗК 1 та КВС 6 так, щоб головна оптична вісь 4 була наближено перпендикулярна до КВС. Виконують знімання КВС. Переміщують ЦНЗК вздовж оптичної осі за допомогою мікрометричного гвинта 7 та повторно виконують знімання КВС. На отриманих зображеннях вимірюють координати на відповідних перетинах КВС та визначають фокусну віддаль ЦНЗК.

Для всіх запропонованих способів виконано апробацію камерою Canon EOS 450D. В дисертаційній роботі наведено результати визначення апріорної точності та фокусної віддалі запропонованими способами. На запропоновані перший та другий способи одержано патенти на корисну модель «Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової знімальної камери».

Для дослідження дисторсійних спотворень ЦНЗК створено просторовий тестовий полігон у холі 6 поверху Інституту геодезії Національного університету «Львівська політехніка», який є схематичною моделлю виходу льодовиків. Тобто, у відповідному масштабі (зменшеному) відтворено віддаль до льодовика, базис знімання та конфігурацію виходу льодовика. На частину стіни холу нанесені опорні (9 шт.) та контрольні марки (38 шт.).

Координати перехресть опорних та контрольних марок визначали електронним тахеометром Leica TCR405 Ultra. НЦЗ тестового полігону виконано камерами Canon EOS 450D №2280509198 (надалі №1), Canon EOS 450D №2280509273 (надалі №2) з фокусними віддалями 18 мм, 24 мм, 35 мм, 55 мм та Canon EOS 6D з фокусними віддалями 16 мм, 24 мм, 35 мм. Для всіх камер та різних віддалей розраховано апріорну оцінку точності. Для прикладу у таблиці 1 подано СКП для камери Canon EOS 450D.

Таблиця 1

Апріорна оцінка точності визначення координат точок полігону

$f, \text{ мм}$	$Y_{\phi}, \text{ м}$	$B, \text{ м}$	Значення СКП		
			$\Delta_{x,z}, \text{ мм}$	$\Delta_y, \text{ мм}$	$R, \text{ мм}$
18	4,5	0,5	1,300	11,700	2,600 : 3,677
24	7	0,6	1,517	17,694	3,033 : 4,290
35	8,5	0,7	1,263	15,335	2,526 : 3,572
55	10	0,9	0,945	10,505	1,891 : 2,674

Для врахування дисторсійних спотворень застосовано програмне забезпечення (ПЗ) з відкритим програмним кодом GML Camera Calibration Toolbox. За результатами порівняння вимірних значень координат точок до та після врахування дисторсійних спотворень з еталонним отримано значення залишкових похибок. Для аналізу результатів наведено графіки різниць величин координат контрольних точок до та після врахування дисторсійних спотворень. Для прикладу подано графіки для камери Canon EOS 450D №2 для фокусної віддалі 18 мм по осях X та Z (рис. 3).

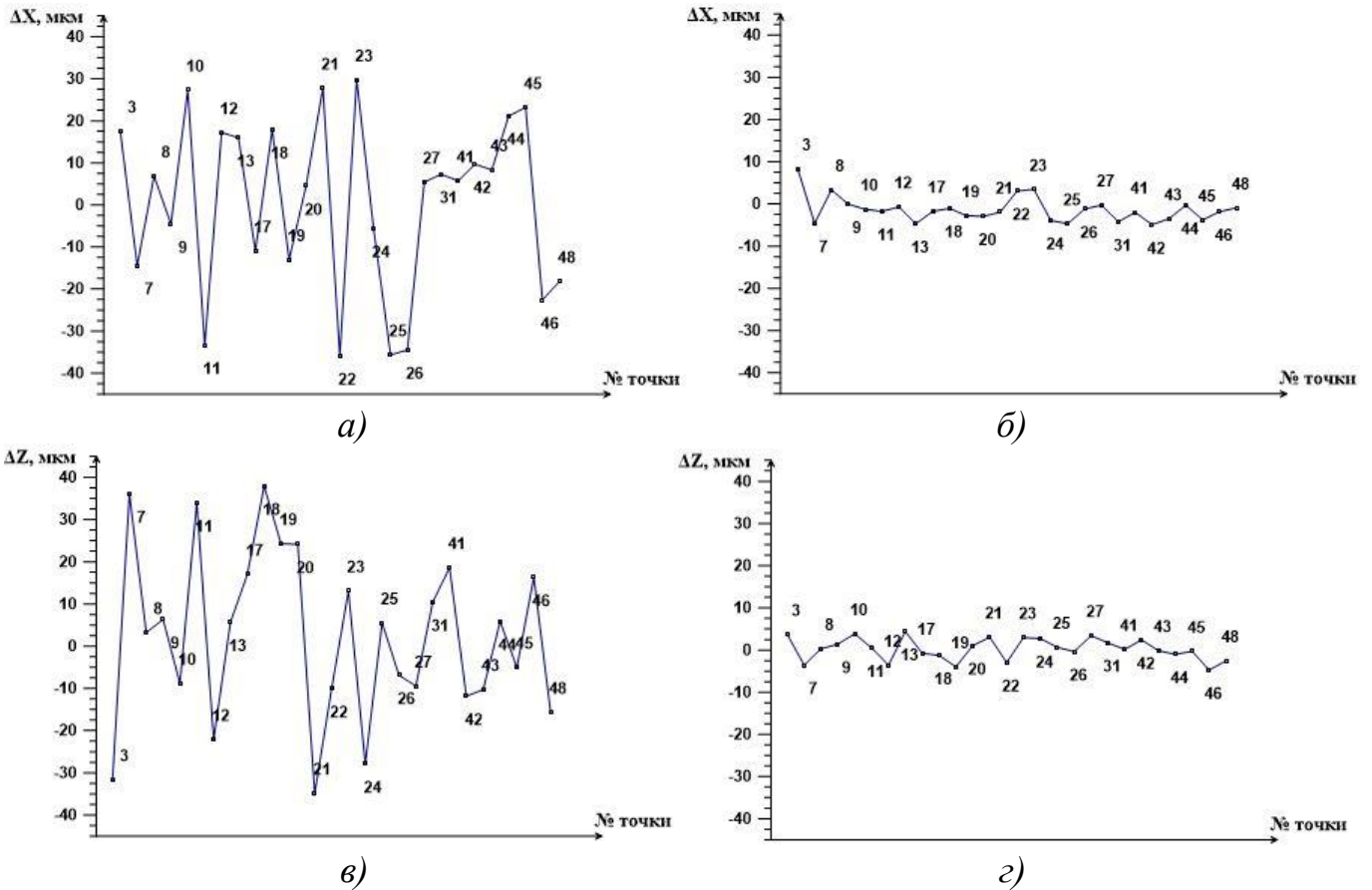


Рис. 3. Величини похибок визначення координат контрольних точок: а) по осі X до врахування дисторсії; б) по осі X після врахування дисторсії; в) по осі Z до врахування дисторсії; г) по осі Z після врахування дисторсії

Середньоквадратичне відхилення залишкових похибок становить 0,6 піксела по осі X та 0,4 піксела по осі Z.

Дослідження точності побудови хмари точок методом наземного лазерного сканування. Згідно з задачами дисертаційної роботи реалізовано експеримент, який полягав у дослідженні хмар точок, а саме їх щільності, інтервалу між точками, змін інтенсивності залежно від зміни віддалі та кольору об'єкта сканування. Оскільки поверхня льодовика характеризується не тільки відтінками білого (сніг, фірн, лід), а й темними («старий» лід), які близькі до чорного кольору, тому виконано дослідження граничного діапазону кольорів.

НЛС виконано наземним лазерним сканером Faro Focus 3D S120 в лабораторних умовах. Для виконання експериментальних робіт створено спеціальну тестову марку – шліфовану скляну платівку розміром 30 см × 30 см, яку було двічі покрито аерозолем білого матового забарвлення з відбивною здатністю близько 80%, з однієї сторони марки та чорного матового забарвлення з відбивною здатністю близько 20%, з іншої сторони марки. Товщина покриття не перевищувала 2-3 мкм.

Для виконання експериментальних робіт тестову марку встановлювали на підставку штатива за допомогою втулки. Марку розташовували білою стороною на віддалі 0,6 м від наземного лазерного сканера та виконували сканування білої та чорної сторін марки на віддальх 1,5 м, 3 м, 5 м, 10 м. Значення інтенсивності експортовано з хмар точок за допомогою ПЗ Faro SCENE.

Аналізуючи результати експериментальних робіт, можна зробити висновок, що для віддалі між об'єктом сканування та сканером 0,6 м характерна неоднорідність щільності хмар точок, а крок сканування не відповідає запланованому. Ситуація покращується зі збільшенням віддалі, хоча для фрагментів хмар точок тестової марки для віддалі 10 м все ж спостерігається незначне зменшення горизонтального кроку сканування відносно запланованого. Щодо значень інтенсивності, то найбільша потужність повернутого сигналу спостерігається для віддалей 0,6 м та 5 м (рис. 4 а).

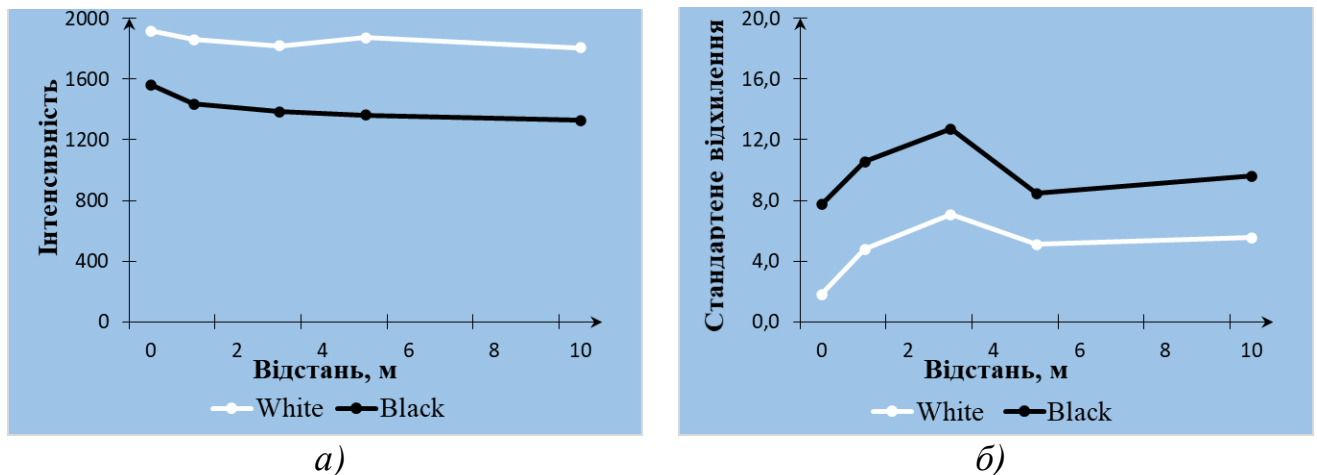


Рис. 4. Залежність змін інтенсивності: а) від зміни віддалі до об'єкта; б) розподіл стандартного відхилення

На рис. 4 б подано розподіл стандартного відхилення значень інтенсивності. Враховуючи всі результати, можна зробити висновок, що максимальну точність можна отримати в діапазоні сканування 5-10 м. Водночас, для сканування з віддалі 0,6 м спостерігаємо неоднорідність хмари точок, а час сканування більший.

Вибір оптимальних параметрів сканування слід здійснювати з врахуванням віддалі до об'єкта та кольору поверхні. Проте, для сканування льодовиків також варто враховувати час сканування відповідно до обраних параметрів.

У **третьому розділі** «Розробка методики комплексного дослідження змін поверхневих об'ємів острівних льодовиків» запропоновано технологічну схему, яка складається з таких основних процесів: створення технічного проєкту, польові вимірювання, попереднє опрацювання результатів вимірювань, побудова цифрових моделей поверхонь льодовиків, визначення змін поверхневих об'ємів (рис. 5).

Перший етап «Створення технічного проєкту» передбачає обґрунтування науково-методичного забезпечення виконання робіт, матеріально-технічне забезпечення виконання робіт, календарний план робіт та обсяги робіт та основні вимоги до реалізації методики досліджень. Основні вимоги до реалізації методики досліджень повинні містити опис обсягу робіт та порядок їх виконання, основні методичні та технічні вимоги, яких необхідно дотримуватися під час виконання робіт. Також необхідно вказати попередні параметри НЛС та НЦЗ, подати схеми розташування станцій стояння сканера та контрольних марок (сфер) для НЛС, базисів та опорних точок для НЦЗ. Наводять результати розрахунку попередньої оцінки точності.



Рис. 5. Технологічна схема комплексної методики

На наступних етапах виконують польові роботи наземного лазерного сканування та цифрового знімання, а за отриманими матеріалами камеральне опрацювання.

Через складність рельєфу, відбивну поверхню та інші чинники, дані НЛС в більшості випадків міститимуть «мертві» зони. Для отримання даних про поверхню льодовика в цих зонах згідно з методикою комплексного дослідження виконують НЦЗ. Для виявлення «мертвих» зон та визначення ділянок, що підлягають НЦЗ, запропоновано алгоритм, що складається з таких процесів (рис. 6):

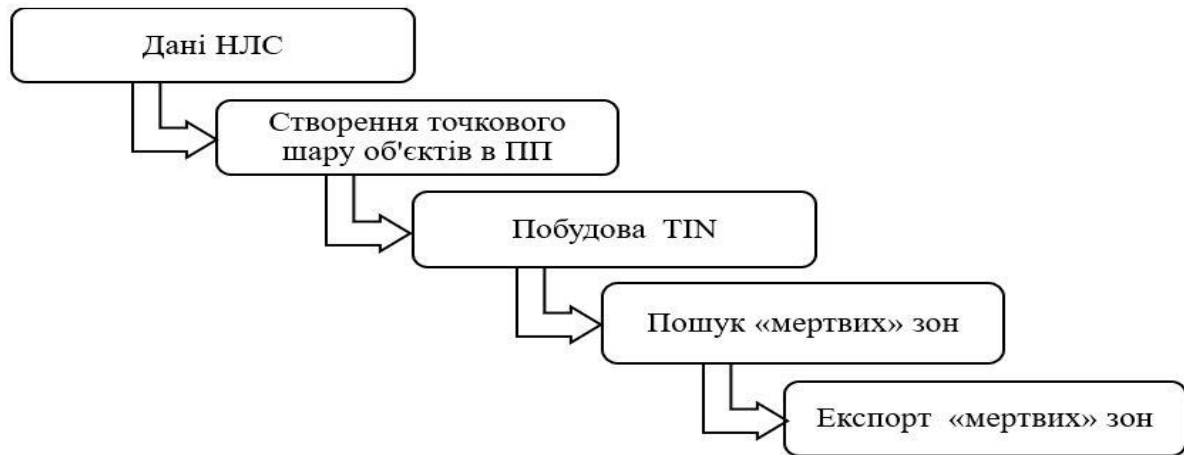


Рис. 6. Технологічна схема алгоритму виявлення «мертвих» зон НЛС

Оскільки реалізація стереофотограмметричного методу полягає в побудові цифрової моделі рельєфу (ЦМР) поверхні виходів льодовиків, запропоновано алгоритм оптимізації вибору інтервалу сітки ЦМР. Для побудови ЦМР необхідно задати сітку з регулярним розміщенням точок та квадратною елементарною комірною. Оскільки існують відповідні вимоги до точності отримання значень об'ємів, то для визначення параметрів сітки вважатимемо відносну похибку об'єму відомою як значення похибки функції, а відносні похибки геометричних параметрів льодовика визначуваними аргументами. Це є оберненою задачею теорії похибок, якщо потрібно визначити граничні відносні похибки аргументів так, щоб відносна похибка функції не перевищувала заданої величини.

Перший етап передбачає обчислення апріорної оцінки точності визначення координат точок. *Другим етапом* є задання точності визначення об'єму льодовиків. Об'єм об'єкта визначають за формулою:

$$V = S\Delta Y, \quad (1)$$

де ΔY – глибина льодовика.

Для оцінки точності визначення об'ємів переходять до СКП і обчислюють відносну похибку визначення об'єму льодовика. Відносна похибка визначення об'єму в такому випадку дорівнюватиме 1-2%, що є достатнім для гляціологічних вимог. Для подальших розрахунків вважатимемо, що гранична відносна похибка визначення зміни об'єму становить 1%.

Третій етап передбачає визначення граничної відносної похибки визначення глибини об'єкта. Значні коливання глибин точок на місцевості призводять до зміщень їх зображення на знімках. Визначаємо граничне значення глибини в межах елементарної комірки сітки.

Четвертим етапом є обчислення граничної відносної похибки визначення площі об'єкта. Відносну похибку визначення площі знайдемо через уже відомі значення відносних похибок визначення об'єму та глибини об'єкта. Для подальших розрахунків приймемо, що гранична відносна похибка визначення площі всього об'єкта дорівнює граничній відносній похибці визначення площі елементарної комірки сітки.

П'ятим етапом є безпосереднє обчислення оптимального інтервалу сітки. Спочатку обчислюють площу елементарної комірки через відносну похибку

визначення площі елементарної комірки та довжину сторони елементарної комірки сітки. Отримана формула дозволяє обчислити інтервал сітки для побудови ЦМР у випадку, коли значення ΔY в межах комірки сітки є меншим або рівним граничному. Якщо значення ΔY більші за $\Delta Y_{гран.}$, то розраховують кількість зон, в межах яких ΔY є допустимим. Тоді інтервал сітки створюваної ЦМР обчислюють як відношення довжини сторони елементарної комірки до кількості зон.

Визначення змін поверхневих об'ємів складається з процесів об'єднання точкових моделей НЛС та ЦМР «мертвих» зон за даними НЦЗ, побудови TIN моделей, обчислення об'ємів відносно площини початкового відліку, обчислення різниць об'ємів між циклами спостережень, побудови номограм.

Для визначення змін об'ємів запропоновано метод прямокутної призми. Такий вибір пояснюється ефективністю обчислень об'єму об'єкта відносно деякої площини (надалі вживатимемо площиною початкового відліку). Площину обирають після імпорту даних у програмне забезпечення та приведення їх до єдиної системи координат і розташовують у строго вертикальному положенні на максимальній віддалі від пунктів нульового циклу спостережень (вглиб льодовика).

Зміну об'єму виходу льодовика обчислюють як сумарну кількість об'ємів окремих призм за методом прямокутної призми:

$$V = F * (y_m - y_0), \quad (2)$$

де

$$y_m = \frac{\sum_{i=1}^n (g_i * y_i)}{4 * n}, \quad (3)$$

де i – номер одного чотирикутника; y_m – середня глибина; F_i – площа всього об'єкта; g_i – кількість вершин суміжних трикутників; y_i – глибина вершини; n – кількість усіх чотирикутників; y_0 – глибина площини початкового відліку.

Для обчислення змін поверхневих об'ємів запропоновано обирати сталу площину початкового відліку для всіх циклів спостережень. Відносно цієї площини обчислюють значення об'ємів, а потім знаходять різниці для сусідніх циклів спостережень.

У четвертому розділі «Апробація методики комплексного дослідження змін поверхневих об'ємів льодовиків» з метою аналізу точності комплексного дослідження виконано апробацію методики для виходів льодовиків на островах Галіндез та Вінтер (Аргентинські острови архіпелагу Вільгельма, Антарктичний півострів). Матеріали наземного лазерного сканування та наземного цифрового знімання отримано в ході сезонних Українських антарктичних експедицій: XVII (2013 р.), XVIII (2014 р.), XXIII (2018 р.), XXIV (2019 р.) працівниками Інституту геодезії Національного університету «Львівська політехніка».

Сканування західного та південного виходів льодовика о. Галіндез та південного виходу льодовика о. Вінтер (2013 р., 2014 р., 2018 р.) виконано наземним лазерним сканером Faro Focus 3D S120, а знімання (2013 р., 2014 р., 2018 р., 2019 р.) – цифровими камерами Canon EOS 450D та Canon EOS 6D Canon Mark III D, діапазон фокусних віддалей: 16 мм, 18 мм, 35 мм, 55 мм).

НЦЗ виконано з довгострокових центрів знімання (рис. 7).

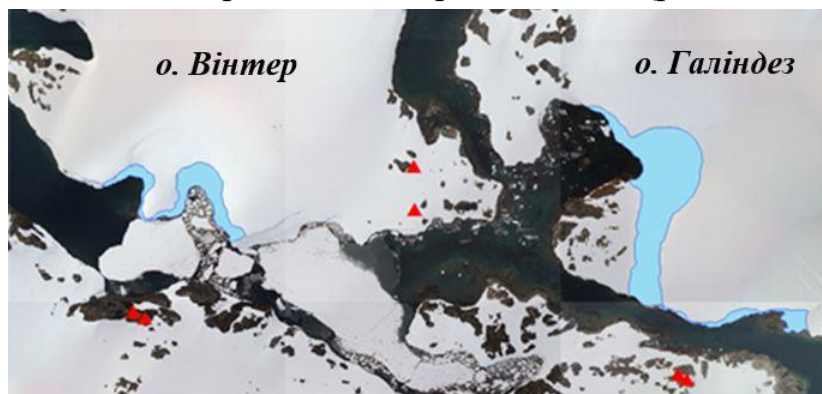


Рис. 7. Розташування базисів (▲) та виходів льодовиків на о. Вінтер та о. Галіндез (■ - досліджувана поверхня)

Як опорні точки обирали характерні форми рельєфу поверхні льодовиків та плоскі марки. Для будь-якого сезону спостережень та кожного з виходів льодовика кількість опорних точок становила від 10 до 20.

Для планово-висотної прив'язки станцій стояння сканера, контрольних марок (сфер), базису знімання та опорних точок до єдиної системи координат виконували ГНСС-спостереження. Іноді для вимірювання координат опорних точок виконували тахеометричну зйомку електронним тахеометром Leica TCR405 Ultra.

Для опрацювання матеріалів НЛС застосовували ПЗ Faro Scene та Leica Cyclone. Опрацювання даних в ПЗ Faro Scene полягає у створенні проекту, імпорту хмар точок, фільтрації та реєстрації сканів. У результаті отримано точкові моделі льодовиків островів Галіндез та Вінтер. Для прикладу наведено точкові моделі досліджуваних частини льодовиків о. Галіндез за 2013 р. та 2018 р. (рис.8-10).

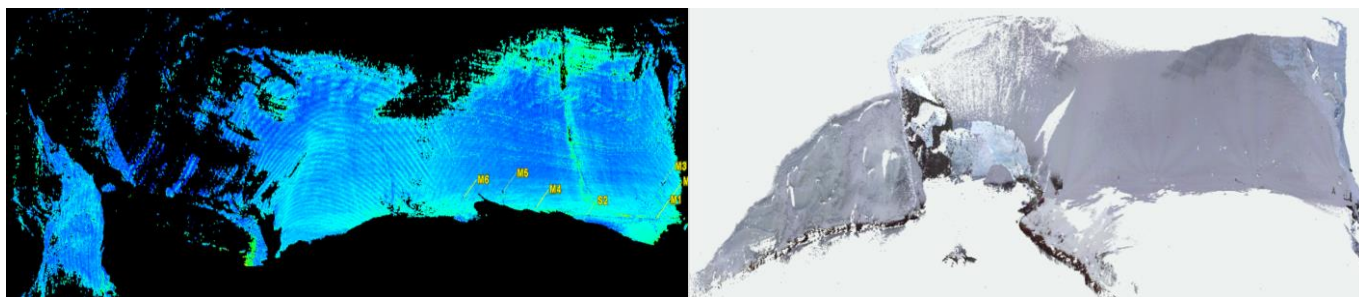


Рис. 8. Точкові моделі за результатами наземного лазерного сканування західної частини льодовика на о. Галіндез: а) 2013 р.; б) 2018 р.

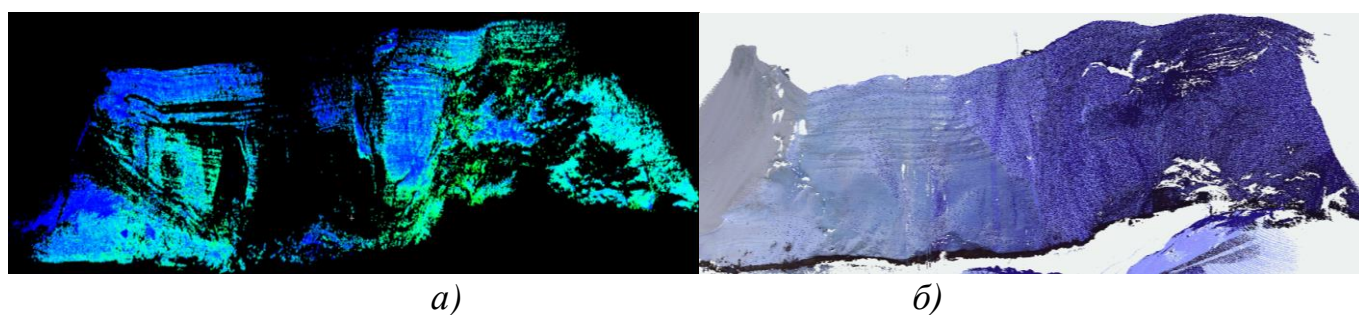


Рис. 9. Точкові моделі за результатами наземного лазерного сканування південної частини льодовика на о. Галіндез: а) 2013 р.; б) 2018 р.

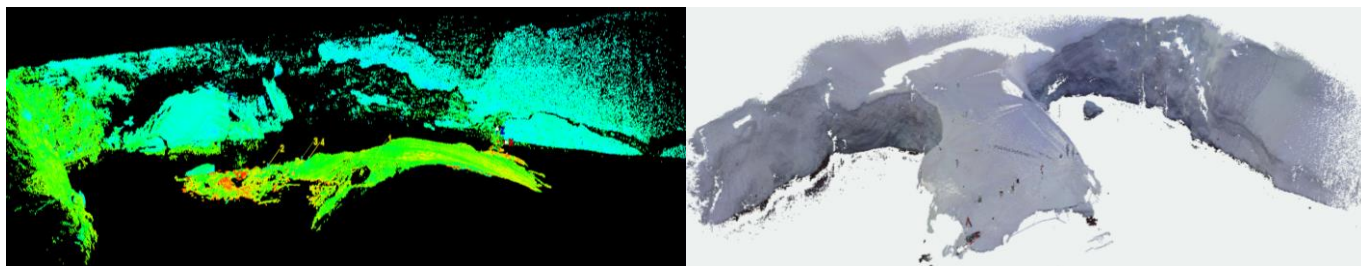


Рис. 10. Точкові моделі за результатами наземного лазерного сканування південної частини льодовика на о. Вінтер: а) 2013 р.; б) 2018 р.

Точкові моделі НЛС за 2018 р. містять значно менше «мертвих» зон порівняно з точковими моделями за 2013 р., що пояснюється вдосконаленою технологією польових робіт у 2018 р.

Для подальшого опрацювання даних за алгоритмом оптимізації інтервалу сітки ЦМР розраховано інтервал регулярної сітки ЦМР для визначення змін об'ємів виходів льодовиків з точністю 1%. Для прикладу, подано цифровий знімок західної сторони виходу льодовика на о. Галіндез (рис. 11). Розміри виходів льодовиків наведено у таблиці 2, а значення очікуваної точності визначення координат точок та об'ємів подано у таблиці 3.

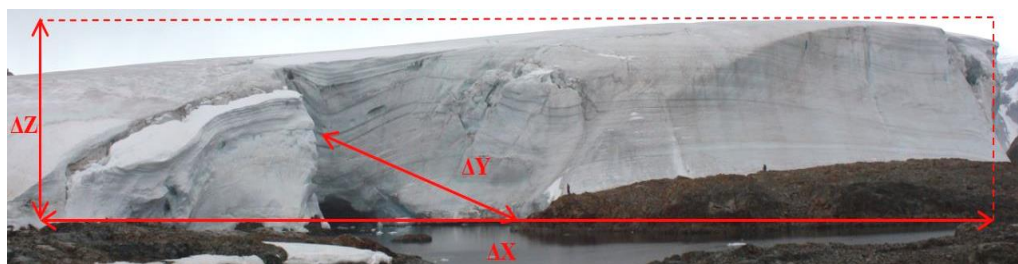


Рис. 11. Вихід західної частини льодовика на о. Галіндез та схематичне подання його розмірів

Таблиця 2

Розміри льодовиків

Об'єкт	Максимальні габаритні розміри		
	$\Delta X, м$	$\Delta Z, м$	$\Delta Y, м$
Вихід західної частини льодовика на о. Галіндез	160	35	50
Вихід південної частини льодовика на о. Галіндез	175	40	30
Вихід південної частини льодовика на о. Вінтер	155	20	61

Таблиця 3

Визначення апріорної оцінки точності

Об'єкт	$B, м$	$Y_{\phi}, м$	Значення СКП			$\frac{m_V}{V}, \%$
			$\Delta_{x,z}, см$	$\Delta_y, см$	$R, см$	
Вихід західної частини льодовика на о. Галіндез	46	220	6,4	30,4	12,7:18,0	0,7
Вихід південної частини льодовика на о. Галіндез	10	75	2,2	16,6	4,3:6,1	0,5
Вихід південної частини льодовика на о. Вінтер	13,5	150	4,3	48,1	8,7:12,3	0,6

Результати обчислення інтервалу сітки для побудови ЦМР подано у таблиці 4.

Оптимальний інтервал сітки для побудови ЦМР

Назва об'єкта	$m_a, \text{М}$	$a, \text{м}$	n	$a_{\text{зони}}, \text{М}$
Вихід західної частини льодовика на о. Галіндез	0,27	55,5	42	1,3
Вихід південної частини льодовика на о. Галіндез	0,14	30	25	1,2
Вихід південної частини льодовика на о. Вінтер	0,41	84,4	51	1,7

Для виявлення «мертвих» зон НЛС та визначення ділянок, що підлягають НЦЗ реалізовано алгоритм виявлення «мертвих» зон НЛС. Алгоритм реалізовано в ПЗ ArcGis за допомогою моделі геообробки (рис. 12).

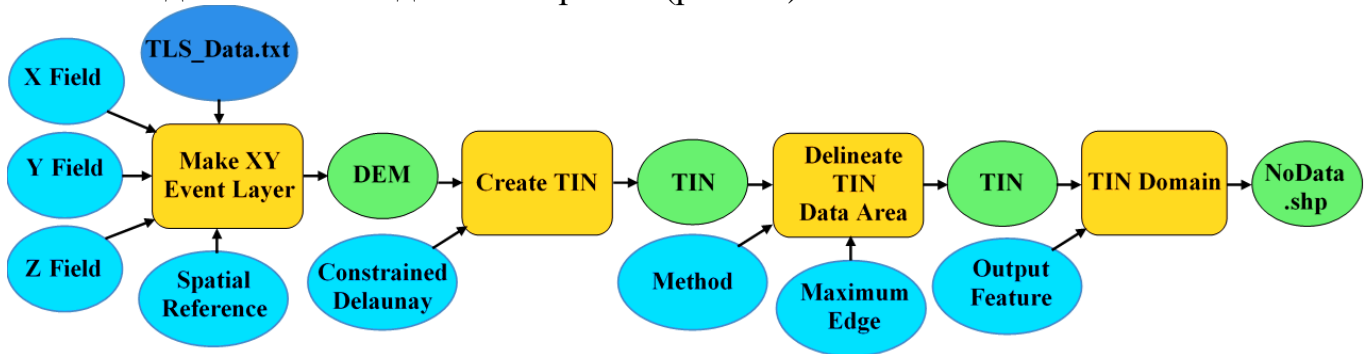


Рис. 12. Модель геообробки для реалізації алгоритму виявлення «мертвих» зон НЛС

Відповідно до моделі геообробки першим кроком є завантаження даних НЛС. Для ідентифікації даних застосовують інструмент Make XY Event Layer, задають розташування координат (X, Y, Z Field) та просторову прив'язку даних (Spatial Reference). За отриманою точковою моделлю даних НЛС (DEM) виконують побудову TIN (Create TIN) із застосуванням триангуляції Делоне (Constained Delounau). Третім процесом є пошук «мертвих» зон за довжиною ребер трикутників (Maximum Edge, Method) за допомогою інструмента Delineate TIN Data Area. Останнім процесом є експорт виявлених зон у формат SHP (Output feature), який у подальшому завантажують в ПЗ Digital. Для цього застосовують інструмент TIN Domain, а результатом реалізації алгоритму є файл NoData.

В результаті реалізації алгоритму в місцях «мертвих» зон НЛС отримують полігон з вирізаним фрагментами (рис. 13 а), де віддаль між точками не перевищує розрахований інтервал сітки для побудови ЦМР. На рис. 13 б подано мертві зони з доповненими НЦЗ точками цифрової моделі рельєфу. Пізніше за даними НЦЗ доповнюють ЦМР виходів льодовиків (рис. 13 б).



Рис. 13. Реалізація алгоритму виявлення «мертвих» зон НЛС для південної частини льодовика на о. Галіндез (2013 р.): а) з мертвими зонами (до); б) з доповненими точками за даними НЦЗ (після)

Процес опрацювання матеріалів НЦЗ включав підготовчі роботи, попереднє опрацювання даних, орієнтування знімків та побудову цифрової моделі рельєфу. На етапі підготовчих робіт проаналізовано матеріали знімання та виконано апріорну оцінку точності отримання координат точок місцевості (таблиця 3).

Врахування дисторсійних спотворень на знімках здійснювали в ПЗ GML Camera Calibration Toolbox, а орієнтування – на ЦФС «Дельта-2» в додатку Models. Перед побудовою ЦМР у додатку Digitals побудовано сітку за вище розрахованим інтервалом (таблиця 4) відповідно для кожного з виходів льодовиків. Отримані полігони з алгоритму виявлення «мертвих» зон НЛС, слугують маскам для побудови цифрових моделей поверхонь льодовиків за даними НЦЗ. Для прикладу на рис.13 б подано результат доповнення точкових моделей НЛС ЦМР за даними НЦЗ для фрагменту виходу південної частини льодовика на о. Галіндез. Для перевірки точності ЦМР виконано порівняння координати Y (глибини) точок поверхні льодовика за даними обох методів. Обчислення виконано для 50 точок фрагмента поверхні виходу південної частини льодовика на о. Галіндез. СКП становить 16,1 см, що не перевищує розрахункову точність.

Визначення змін поверхневих об'ємів льодовиків складається з об'єднання точкових моделей НЛС та ЦМР «мертвих» зон за даними НЦЗ, побудови TIN моделей, обчислення об'ємів відносно площини початкового відліку та різниць об'ємів між циклами спостережень, побудови номограм змін поверхневих об'ємів.

Для інтеграції матеріалів відповідні ЦМР поверхонь виходів льодовиків за даними НЛС та НЦЗ експортовано у ПЗ Leica Cyclone. За об'єднаними даними побудовано TIN модель. Отримані TIN моделі візуально перевірено, за необхідності виконано редагування. В ПЗ Leica Cyclone для визначення об'ємів застосовано метод прямокутної призми. Для обчислення змін поверхневих об'ємів побудовано строго вертикальну площину початкового відліку, яка є сталою для всіх циклів спостережень. Розрахунок об'єму льодовикових мас здійснюється від площини початкового відліку. Для прикладу подано визначення поверхневого об'єму південної частини льодовика на о. Вінтер у 2013 р. (рис. 14).

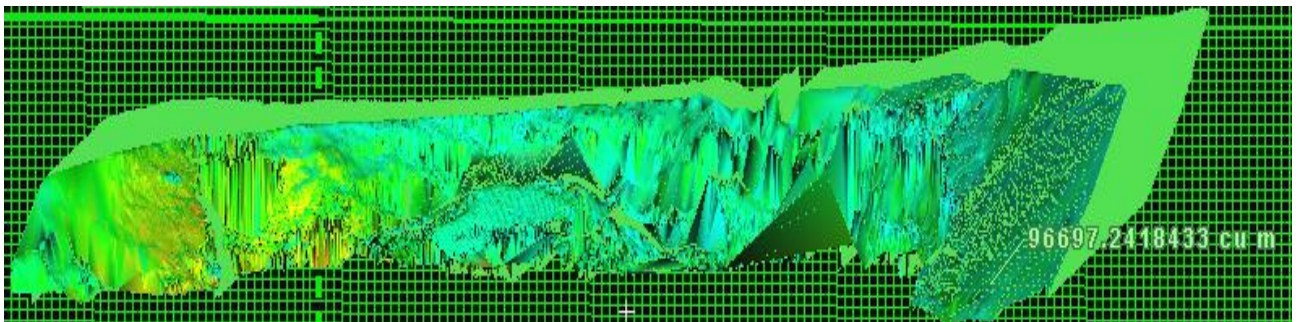


Рис. 14. Визначення поверхневого об'єму південної частини льодовика на о. Вінтер у 2013 р.

За результатами наземного лазерного сканування (2013 р., 2014 р., 2018 р.) та цифрового стереофотограмметричного знімання (2013 р., 2014 р., 2018 р., 2019 р.) західного та південного виходів льодовика острова Галіндез та південного виходу льодовика на острові Вінтер встановлено зміни поверхневих об'ємів (таблиця 5).

Результати визначення змін (зменшення) поверхневих об'ємів льодовиків

Льодовик о. Галіндез, західна частина		Льодовик о. Галіндез, південна частина		Льодовик о. Вінтер, південна частина	
Період часу	Об'єм (м ³)	Період часу	Об'єм (м ³)	Період часу	Об'єм (м ³)
2002 – 2003	23000	2002 – 2003	1500	2002 – 2003	–
2003 – 2004	28000	2003 – 2004	350	2003 – 2004	1250
2004 – 2005	17000	2004 – 2005	4800	2004 – 2005	4800
2005 - 2013	64000	2005 – 2013	94000	2005 – 2013	82000
2013 -2014	16000	2013 – 2014	500	2013 – 2014	1400
2014-2018	1200	2014 – 2018	600	2014 – 2018	800
2018 -2019	36000	2018 – 2019	1100	2018 – 2019	9800

Аналізуючи отримані результати, можна зауважити кардинальні зміни, які виникли в об'ємах льодовиків з 2002 р. Це підтверджується визначеними кількісними параметрами та результатами інших досліджень у регіоні Антарктичного півострова.

ВИСНОВКИ

1. На підставі аналізу літературних джерел, в яких розглянуто технологічні процеси досліджень динаміки змін льодовиків, встановлено що для дослідження виходів льодовиків доцільно застосовувати наземне лазерне сканування та цифрове знімання. Для моніторингу змін льодовикових поверхонь пропонується комбінування методів НЛС та НЦЗ.

2. Розроблено та апробовано три нові способи визначення фокусної віддалі ЦНЗК, які застосовували для знімання льодовиків. Способи дають змогу оперативно в камеральних умовах визначити фокусну віддаль з відповідною точністю, що не перевищує допустимої точності вимірювання координат знімків на ЦФС. Вибір способу визначення фокусної віддалі ЦНЗК варто здійснювати, враховуючи параметри камери та наявність відповідних технічних засобів. Для знімання льодовиків пріоритетним є застосування другого способу.

3. Встановлено точність визначення координат точок до та після врахування дисторсійних спотворень. Залишкові похибки вимірювання координат точок після врахування дисторсійних спотворень не перевищують розміру пікселя. Точність побудови хмар точок методом наземного лазерного сканування залежить від віддалі до льодовика та інтенсивності відбиття поверхні сканування.

4. Уперше розроблено та апробовано методу комплексного дослідження змін поверхневих об'ємів льодовиків із застосуванням методів наземного лазерного сканування та цифрового стереофотограмметричного знімання. Точність визначення змін поверхневих об'ємів за запропонованою методикою становить 1%, що відповідає гляціологічним вимогам. Параметри сканування і побудови ЦМР розраховані відповідно до необхідної точності.

5. Для виявлення «мертвих» зон та визначення ділянок, що підлягають НЦЗ, запропоновано алгоритм, який реалізовано шляхом виключення з TIN

поверхні льодовиків окремих трикутників. Спосіб виключення трикутників базується на триангуляції Делоне та аналізі довжин ребер.

6. Запропоновано та апробовано алгоритм оптимізації інтервалу ЦМР. Обчислено інтервал сітки для побудови моделей поверхонь льодовиків у місцях «мертвих» зон НЛС. Діапазон інтервалу сітки коливається в межах 1,2-1,7 м.

7. Досліджено та проаналізовано зміни поверхневих об'ємів виходів льодовиків на о. Галіндез та о. Вінтер упродовж 2013-2014 та 2014-2018 років. У результаті за 2013-2014 роки об'єм західної частини льодовика на о. Галіндез зменшився на 16000 м³, південної частини цього льодовика – 500 м³, а льодовика на о. Вінтер – 1400 м³. Відповідно упродовж 2014-2018 років об'єм західної частини льодовика на о. Галіндез зменшився на 1200 м³, південної частини цього льодовика – 600 м³, а льодовика на о. Вінтер – 800 м³. Наведені результати свідчать про загальну тенденцію зменшення льодовиків та неоднорідність їх змін.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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

Статті у наукових періодичних виданнях іншої держави, що включені до міжнародних наукометричних баз даних

1. Tretyak K. Complex geodetic research in Ukrainian Antarctic station «Academician Vernadsky» (years 2002- 2005, 2013-2014) / K. Tretyak, V. Hlotov, Yu. Holubinka, **Kh. Marusazh** // Reports on Geodesy and Geoinformatics. – 2016. – Vol. 100. – p. 149-163. – doi.org/10.1515/rgg-2016-0012 (Web of Science).
2. Hlotov V. The proposal of determining the focal length of a non-metric digital camera for UAV / V. Hlotov, **Kh. Marusazh**, Z. Siejka // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – № 603 022050. – p. 1-12. doi:10.1088/1757-899X/603/2/022050 (Scopus).

Статті в наукових фахових виданнях України, що включені до міжнародної наукометричної бази даних

3. Глотов В. М. Оптимізація інтервалу сітки для побудови ЦМР під час визначення поверхневих об'ємів острівних льодовиків Антарктичного узбережжя / В. М. Глотов, **Х. І. Марусаж** // Геодезія, картографія і аерофотознімання: міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2015. – № 82. – С. 95-109 (Index Copernicus).
4. Hlotov V. M. Accuracy investigation of point clouds with Faro Focus 3D S120 terrestrial laser scanner / V.M. Hlotov, **Kh. I. Marusazh** // Geodesy, Cartography and Aerial Photography. – 2019. – № 90. – С. 41-49 (Index Copernicus).

Статті у наукових фахових виданнях України

5. Глотов В. Аналіз методів створення фронтальних планів лазерним наземним скануванням та цифровим зніманням / В. Глотов, **Х. Марусаж** // Геодезія, картографія і аерофотознімання: міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2013. – № 78. – С. 30-37.
6. Марусаж Х. Аналіз сучасних методів дослідження кількісних параметрів льодовиків / **Х. Марусаж** // Сучасні досягнення геодезичної науки та

виробництва: збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК. – 2014. – Випуск 1 (27). – С. 109-117.

7. Глотов В. Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової неметричної знімальної камери / В. Глотов, **Х. Марусаж** // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК. – 2016. – Випуск 1 (31). – С. 105-110.
8. Глотов В. Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової неметричної знімальної камери / В. Глотов, **Х. Марусаж** // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: збірник наукових праць Західного геодезичного товариства УТГК. – 2019. – Випуск 1 (37). – С. 85-90.

Патенти

9. Патент на корисну модель «Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової знімальної камери». Глотов В.М., **Марусаж Х.І.** № 110910 Україна. Бюл. №20, 25.10.2016.
10. Патент на корисну модель «Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової знімальної камери». Глотов В.М., **Марусаж Х.І.** № 135876 Україна. Бюл. №14, 25.07.2019.

2. Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації: матеріали та тези наукових конференцій

11. Третьяк К. Результати визначення поверхневих об'ємів острівних льодовиків антарктичного узбережжя комплексним методом / К. Третьяк, В. Глотов, Ю. Голубінка, **Х. Марусаж** // Збірник наукових праць. XVIII Міжнародний науково-технічний симпозиум «Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GNSS і GIS – технології», Алушта, 10-15 вересня. – 2013 р. – С. 9-16.
12. Глотов В. Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової неметричної знімальної камери / В. Глотов, **Х. Марусаж** // Програма та тези конференції. 21 Міжнародна науково-технічна конференція «Геофорум-2016». – 2016 р. – С. 40-41.
13. Глотов В. Спосіб підвищення точності побудови цифрової моделі поверхні виходів острівних льодовиків Антарктичного узбережжя / В. Глотов, **Х. Марусаж** // Збірник матеріалів конференції Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «GeoTerrace-2016». – 2016. – С. 117-121.
14. Глотов В. Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової неметричної камери / В. Глотов, **Х. Марусаж** // Тези доповідей. 24 Міжнародна науково-технічна конференція «Геофорум-2019». – 2019 – С. 38-39.
15. Hlotov V. The proposal of determining the focal length of a non-metric digital camera for UAV / V. Hlotov, **Kh. Marusazh**, Z. Siejka // Abstract Collection Book “World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium”, Prague (Czech Republic), 17-21 June 2019. – 2019. – p. 369.
16. Hlotov V. Accuracy investigation of create points cloud with Faro Focus 3D S120 terrestrial laser scanner / V. Hlotov, **Kh. Marusazh** // 9th international scientific-technical conference “Environmental Engineering, Photogrammetry, Geoinformatics – Modern Technologies and Development Perspectives”, 17-20 September 2019, Lublin (Poland). – 2019. – p. 81-82.

17. **Марусаж Х.** Результати моніторингу виходів льодовиків островів Галіндез та Вінтер у 2018–2019 роках / Х. Марусаж, В. Глотов // Матеріали 25-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Геофорум-2020». – 2020 – С. 40-43.

3. Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

18. **Marusazh Kh. I.** Monitoring of glacier frontal parts on Galindez and Winter Islands (the Argentine Islands) in 2018-2019 years / Kh. I. Marusazh, V.M. Hlotov, Z. Siejka // Ukrainian Antarctic journal. – 2019. – № 2 (19). – С. 26-37.

АНОТАЦІЯ

Марусаж Х.І. Розробка методики комплексного дослідження змін поверхневих об'ємів островних льодовиків Антарктичного узбережжя. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.24.01 «Геодезія, фотограмметрія та картографія». – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2020.

Дисертаційна робота полягає у розробці та дослідженні методики комплексного дослідження змін поверхневих об'ємів островних льодовиків Антарктичного узбережжя методами наземного лазерного сканування та наземного цифрового знімання.

У роботі подано сучасний стан досліджень льодовиків в регіоні Антарктичного півострова. Розглянуто та проаналізовано методи для моніторингу льодовиків та запропоновано їх класифікацію. Сформовано відповідні висновки щодо переваг та недоліків застосування методів. Розроблено способи визначення фокусної віддалі ЦНЗК, виконано їх дослідження та апробація. Досліджено та враховано вплив дисторсійних спотворень ЦНЗК. Подано дослідження точності побудови хмари точок методом наземного лазерного сканування залежно від віддалі до об'єкта сканування та характеристик поверхні сканування. Подано запропоновану методику комплексного дослідження змін поверхневих об'ємів островних льодовиків антарктичного узбережжя. Висвітлено основні етапи технологічної схеми та надано рекомендації щодо їх виконання. Здійснено апробацію методики для моніторингу льодовиків на о. Вінтер та о. Галіндез упродовж 2013-2014 та 2014-2018 років. Аналіз отриманих результатів та попередніх досліджень дозволяє зробити висновок, що упродовж 2013-2019 років льодовик о. Галіндез загалом втратив до 3 % свого об'єму, а льодовик острова Вінтер – до 2%.

Ключові слова: льодовики, наземне лазерне сканування, наземне цифрове знімання, зміна поверхневих об'ємів, моніторинг.

АННОТАЦИЯ

Марусаж Х.И. Разработка методики комплексного исследования изменений поверхностных объемов островных ледников Антарктического побережья. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.24.01 «Геодезия, фотограмметрия и картография». - Национальный университет «Львовская политехника», Львов, 2020.

Диссертационная работа заключается в разработке и исследовании методики комплексного исследования изменений поверхностных объемов островных ледников Антарктического побережья методами наземного лазерного сканирования и наземной цифровой съемки.

В работе представлено современное состояние исследований ледников в регионе Антарктического полуострова. Рассмотрены и проанализированы методы для мониторинга ледников и предложена их классификация. Сформированы соответствующие выводы относительно преимуществ и недостатков применения методов. Разработаны способы определения фокусного расстояния ЦНСК, выполнено их исследование и апробация. Исследовано и учтено влияние дисторсии ЦНСК. Представлены исследования точности построения облака точек методом наземного лазерного сканирования в зависимости от расстояния до объекта сканирования и характеристик поверхности сканирования. Подано предложенную методику комплексного исследования изменений поверхностных объемов островных ледников Антарктического побережья. Освещены основные этапы технологической схемы и даны рекомендации по их выполнению. Осуществлена апробация методики для мониторинга ледников на о. Винтер и о. Галиндез на протяжении 2013-2014 и 2014-2018 лет. Анализ полученных результатов и предыдущих исследований позволяет сделать вывод, что на протяжении 2013-2019 лет ледник о. Галиндез в целом потерял до 3% своего объема, а ледник о. Винтер – до 2%.

Ключевые слова: ледники, наземное лазерное сканирование, наземная цифровая съемка, изменение поверхностных объемов, мониторинг.

ANNOTATION

Marusazh Kh. I. Development of the methodology for a complex study of volumes changes of island glaciers on the Antarctic coast. – On the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences by specialty 05.24.01 Geodesy, photogrammetry and cartography. – Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2020.

The dissertation work consists in the development of the methodology for complex research of volume changes of the island glaciers on the Antarctic coast by the methods of terrestrial laser scanning and terrestrial photogrammetry.

The process of glacier formation, methods of their monitoring and the current state glaciers research in the Antarctic region are considered. According to the analysis of literature, the classification of glaciers research methods is offered and the corresponding conclusions concerning advantages and disadvantages of methods application are formed. It is established that the use of terrestrial laser scanning and terrestrial photogrammetry is a priority for monitoring changes in island glaciers. This will avoid “blind” areas of TLS and increase the accuracy of determining volume changes of glaciers.

The analyzes existing methods and ways to determine the internal orientation of digital non-metric cameras, three methods for determining the focal length are proposed, their description, technological implementation, calculation algorithm and approbation results are given. For each of the developed methods, recommendations for use are given

depending on the characteristics of the camera. The influence of distortion of digital non-metric cameras is investigated and taken into account. The sources of TLS errors are analyzed and recommendations for minimizing each of the groups of errors are proposed. A study of the investigation of points cloud by TLS depending on the distance to the scanning object and the characteristics of the scanning surface is presented.

Methodology based on the application of the TLS and the terrestrial photogrammetry are proposed. According to the required accuracy of determining changes of glaciers volume, the parameters of TLS and creation a digital model of the glaciers surface based on terrestrial surveying data were calculated. The workflow of the proposed technique of complex research of volumes changes of island glaciers which takes into account the details of the choice of parameters and data processing. Recommendations are given for the implementation of the stages of technical design, field work of TLS and terrestrial surveying, processing of materials and determination of volume changes. The main attention is paid to the peculiarities of performing measurements of glacial surfaces and the means of their processing. Algorithms for detecting “blind” areas of TLS and optimizing the interval choice for the construction of digital models of glacier surfaces based on terrestrial surveying data are presented.

The application of the proposed methodology for monitoring glaciers on the islands Winter and Galindez during 2013-2014 and 2014-2018 are presented. According to the proposed algorithm, the grid interval for digital model creation of glacier surfaces is calculated. The results of approbation of the algorithm for detecting “blind” area of TLS are presented and polygons are constructed, which serve as masks for digital model creation of glacier surfaces according to terrestrial surveying data. Data of field works were processed and point models obtained according to TLS data and digital models of glacier surfaces obtained according to terrestrial surveying covering “blind” area were built. Volume changes of island glaciers are calculated as the volume differences between observation cycles. Analysis of the results and previous research allows us to conclude that during 2013-2019, the Galindez Glacier has lost up to 3% of its total volume, and the Winter Glacier has lost up to 2%.

Keywords: glaciers, terrestrial laser scanning, terrestrial photogrammetry, volume change, monitoring.

depending on the characteristics of the camera. The influence of distortion of digital non-metric cameras is investigated and taken into account. The sources of TLS errors are analyzed and recommendations for minimizing each of the groups of errors are proposed. A study of the investigation of points cloud by TLS depending on the distance to the scanning object and the characteristics of the scanning surface is presented.

Methodology based on the application of the TLS and the terrestrial photogrammetry are proposed. According to the required accuracy of determining changes of glaciers volume, the parameters of TLS and creation a digital model of the glaciers surface based on terrestrial surveying data were calculated. The workflow of the proposed technique of complex research of volumes changes of island glaciers which takes into account the details of the choice of parameters and data processing. Recommendations are given for the implementation of the stages of technical design, field work of TLS and terrestrial surveying, processing of materials and determination of volume changes. The main attention is paid to the peculiarities of performing measurements of glacial surfaces and the means of their processing. Algorithms for detecting “blind” areas of TLS and optimizing the interval choice for the construction of digital models of glacier surfaces based on terrestrial surveying data are presented.

The application of the proposed methodology for monitoring glaciers on the islands Winter and Galindez during 2013-2014 and 2014-2018 are presented. According to the proposed algorithm, the grid interval for digital model creation of glacier surfaces is calculated. The results of approbation of the algorithm for detecting “blind” area of TLS are presented and polygons are constructed, which serve as masks for digital model creation of glacier surfaces according to terrestrial surveying data. Data of field works were processed and point models obtained according to TLS data and digital models of glacier surfaces obtained according to terrestrial surveying covering “blind” area were built. Volume changes of island glaciers are calculated as the volume differences between observation cycles. Analysis of the results and previous research allows us to conclude that during 2013-2019, the Galindez Glacier has lost up to 3% of its total volume, and the Winter Glacier has lost up to 2%.

Keywords: glaciers, terrestrial laser scanning, terrestrial photogrammetry, volume change, monitoring.

Підписано до друку 07.04.2021 р.
Формат 60×90 1/16. Папір офсетний.
Друк на різнографі. Умовн. друк. арк. 1,5. Обл.-видав. арк. 0,89.
Тираж 100 прим. Зам. 2100439.

Поліграфічний центр
Видавництва Національного університету “Львівська політехніка”
вул. Ф.Колесси, 4, 79013, Львів
Реєстраційне свідоцтво серії ДК № 4459 від 27.12.2012 р.