

Національний університет «Львівська політехніка»

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

МАРУСАЖ ХРИСТИНА ІВАНІВНА

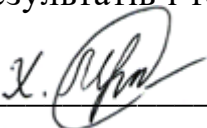
УДК 528.71, 528.72

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

05.24.01 – Геодезія, фотограмметрія та картографія

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

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

 /Марусаж Х.І./

Науковий керівник Глотов Володимир Миколайович, д.т.н., професор

Львів, 2020

АНОТАЦІЯ

Марусаж Х.І. Розробка методики комплексного дослідження змін поверхневих об'ємів острівних льодовиків Антарктичного узбережжя. – Кваліфікаційна наукова праця 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 методики комплексного дослідження змін поверхневих об'ємів острівних льодовиків Антарктичного узбережжя методами наземного лазерного сканування та наземного цифрового знімання.

У першому розділі «Аналіз сучасних методів дослідження кількісних параметрів льодовиків» розглянуто процес формування льодовиків, методи їх моніторингу та сучасний стан досліджень льодовиків в антарктичному регіоні. Згідно аналізу літературних джерел, запропоновано класифікацію методів дослідження льодовиків та сформовано відповідні висновки щодо переваг та недоліків застосування методів. Встановлено, що для моніторингу змін острівних льодовиків пріоритетним є застосування наземного лазерного сканування та наземного цифрового знімання. Це дозволить уникнути «мертвих» зон наземного лазерного сканування 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» проаналізовано існуючі методи і способи визначення елементів внутрішнього орієнтування цифрових неметричних знімальних камер, запропоновано три способи визначення фокусної віддалі, подано їх опис, технологічну реалізацію, алгоритм обчислень та результати апробації. Для кожного з розроблених способів надано рекомендації щодо застосування залежно від характеристик камери. Досліджено та враховано вплив дисторсійних спотворень цифрових неметричних знімальних камер. Проаналізовано джерела похибок наземного лазерного сканування та запропоновано рекомендації для

мінімізації кожної з груп похибок. Подано дослідження точності побудови хмари точок методом наземного лазерного сканування залежно від віддалі до об'єкта сканування та характеристик поверхні сканування.

У третьому розділі «Розробка методики комплексного дослідження змін поверхневих об'ємів острівних льодовиків» подано методику, що базується на застосуванні методу наземного лазерного сканування та доповненні даними цифрового стереофотограмметричного знімання. Відповідно до необхідної точності визначення змін об'ємів льодовиків, розраховано параметри наземного лазерного сканування і побудови цифрової моделі поверхні льодовиків за даними наземного цифрового знімання. Наведено технологічну схему запропонованої методики комплексного дослідження змін поверхневих об'ємів острівних льодовиків, в якій враховано деталізацію вибору параметрів і опрацювання даних. Подано рекомендації до виконання етапів створення технічного проєкту, польових робіт наземного лазерного сканування та наземного цифрового знімання, камерального опрацювання матеріалів та визначення змін поверхневих об'ємів. Основну увагу надано особливостям виконання вимірювань льодовикових поверхонь та засобам їх опрацювання. Наведено алгоритми для виявлення «мертвих» зон наземного лазерного сканування та оптимізації вибору інтервалу для побудови цифрових моделей поверхонь льодовиків за даними наземного цифрового знімання.

У четвертому розділі «Апробація методики комплексного дослідження змін поверхневих об'ємів льодовиків» подано результати застосування запропонованої методики для моніторингу льодовиків на о. Вінтер та о. Галіндез упродовж 2013-2014 та 2014-2018 років. За запропонованим алгоритмом оптимізації розраховано інтервал сітки для побудови цифрової моделі поверхонь льодовиків. Наведено результати апробації алгоритму виявлення «мертвих» зон наземного лазерного сканування та побудовано полігони, що слугують маскам для побудови цифрових моделей поверхонь льодовиків за даними наземного цифрового знімання. Опрацьовано матеріали польових робіт та побудовано точкові моделі, отримані за даними НЛС, та цифрові моделі поверхонь льодовиків, отримані за даними НЦЗ,

що покривають «мертві» зони. Зміни поверхневих об'ємів острівних льодовиків обчислено як різниці об'ємів між циклами спостережень.

Аналіз отриманих результатів та попередніх досліджень дозволяє зробити висновок, що упродовж 2013-2019 років льодовик острова 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.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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

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

1. Глотов, В., & Марусаж, Х. І. (2015). Оптимізація інтервалу сітки для побудови ЦМР під час визначення поверхневих об'ємів острівних льодовиків Антарктичного узбережжя. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, 82, 95-109. (*Index Copernicus*).
2. Hlotov, V., Marusazh, Kh. (2019). Accuracy investigation of point clouds with Faro Focus 3D S120 terrestrial laser scanner. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 90, 41–49. (*Index Copernicus*)

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Глотов, В., & Марусаж, Х. (2013). Аналіз методів створення фронтальних планів лазерним наземним скануванням та цифровим зніманням. *Геодезія, картографія і аерофотознімання: міжвідомчий науково-технічний збірник*, 78, 30-37.
2. Марусаж, Х. (2014). Аналіз сучасних методів дослідження кількісних параметрів льодовиків. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 27(1), 109-117.
3. Глотов, В., & Марусаж, Х. (2016). Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової неметричної знімальної камери. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 31(1), 105-110.

4. Глотов, В., & Марусаж, Х. (2019). Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової неметричної знімальної камери. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 37(1), 85-90.

Статті у наукових періодичних виданнях іншої держави, які включено до міжнародних наукометричних баз даних

1. Tretyak, K., Hlotov, V., Holubinka, Y., & Marusazh, K. (2016). Complex geodetic research in Ukrainian Antarctic station “Academician Vernadsky” (years 2002-2005, 2013-2014). *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 100(1), 149-163. (*Web of Science*).
2. Hlotov, V., Marusazh, K., & Siejka, Z. (2019). The Proposal of Determining the Focal Length of a Non-Metric Digital Camera for UAV. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 603, No. 2, p. 022050). IOP Publishing. (*Scopus*).

Патенти

1. Глотов, В. М., & Марусаж, Х. І. (25.10.2016). *Патент на корисну модель № 110910 Україна, МПК UA G01C 11/00*. Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової знімальної камери. № у 2016 03935; подан. 11.04.2016 р., Бюл. №20.
2. Глотов, В. М., & Марусаж, Х. І. (25.07.2019). *Патент на корисну модель №135876 Україна, МПК UA G01C 11/00*. Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової знімальної камери. № у 2019 01125; подан. 04.02.2019 р., Бюл. №14.

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

1. Третьяк, К., Глотов, В., Голубінка, Ю., & Марусаж, Х. (2013). Результати визначення поверхневих об’ємів острівних льодовиків антарктичного узбережжя комплексним методом. *Збірник наукових праць. XVIII Міжнародний науково-технічний симпозиум «Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GNSS і GIS – технології», Алушта, 10-15 вересня* (с. 9-16).

2. Глотов, В. М., & Марусаж, Х. І. (2016). Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової неметричної камери. *Програма та тези конференції. 21-ша Міжнародна науково-технічна конференція «Геофорум-2016»*. (с. 40-41).
3. Глотов, В. М., & Марусаж, Х. І. (2016). Спосіб підвищення точності побудови цифрової моделі поверхні виходів острівних льодовиків Антарктичного узбережжя. *Збірник матеріалів конференції Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «GeoTerrace-2016»* (с. 117-121).
4. Глотов, В. М., & Марусаж, Х. І. (2019). Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової неметричної камери. *Тези доповідей. 24-а Міжнародна науково-технічна конференція «Геофорум-2019»*. (с. 38-39).
5. Hlotov, V., Marusazh, K., & Siejka, Z. (2019, June). The Proposal of Determining the Focal Length of a Non-Metric Digital Camera for UAV. In *Abstract Collection Book “World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium”* (pp. 369)
6. Hlotov, V., Marusazh, Kh. (2019, September). Accuracy investigation of create points cloud with Faro Focus 3D S120 terrestrial laser scanner. In *9th international scientific-technical conference “Environmental Engineering, Photogrammetry, Geoinformatics – Modern Technologies and Development Perspectives”* (pp. 81-82).
7. Марусаж, Х., Глотов, В (2020). Результати моніторингу виходів льодовиків островів Галіндез та Вінтер у 2018–2019 роках. *Матеріали 25-ї Міжнародна науково-технічної конференції «Геофорум-2020»* (с.40-43).

3. Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації

1. Marusazh, K. I., Hlotov, V. M., & Siejka, Z. (2019). Monitoring of glacier frontal parts on Galindez and Winter islands (the Argentine Islands) in 2018—2019. *Ukrainian Antarctic journal*, 2 (19), 26-37.

ANNOTATION

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

Thesis for obtaining a science degree of a Candidate of Technical Sciences in the specialty 05.24.01 "Geodesy, photogrammetry, and cartography". – Lviv Polytechnic National University. 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 first chapter "Analysis of modern methods of research of quantitative glaciers parameters" considers the process of glacier formation, methods of their monitoring and the current state of research of glaciers in the Antarctic region. According to the analysis of literature sources, the classification of research methods of glaciers is offered and the corresponding conclusions concerning advantages and disadvantages of application of these methods are formed. It is established that the use of terrestrial laser scanning and terrestrial digital surveying is a priority for monitoring changes in island glaciers. This will avoid "blind" areas of terrestrial laser scanning and increase the accuracy of determining volume changes of glaciers.

The second chapter "Development of methods for determining the focal length of a digital non-metric camera and research of a terrestrial laser scanner" 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 distortions of digital non - metric cameras is investigated and taken into account. The sources of terrestrial laser scanning errors are analyzed and recommendations for minimizing each of the groups of errors are proposed. A study of the accuracy of the construction of a point cloud by the method

of terrestrial laser scanning depending on the distance to the scanning object and the characteristics of the scanning surface is presented.

The third chapter "Development of a methodology for a complex research of changes in the volumes of island glaciers" presents a methodology based on the application of the terrestrial laser scanning method and the addition of digital stereophotogrammetric survey data. According to the required accuracy of determining changes of glaciers volume, the parameters of terrestrial laser scanning and construction of a digital model of the glaciers surface based on terrestrial digital 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 is presented. Recommendations are given for the implementation of the stages of technical design, field work of terrestrial laser scanning 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 terrestrial laser scanning and optimizing the interval choice for the construction of digital models of glacier surfaces based on terrestrial surveying data are presented.

The fourth chapter "Approbation of the methodology for a complex research of volume changes of glaciers" presents the "blind" results of the application of the proposed methodology for monitoring glaciers on the islands Winter and Galindez during 2013-2014 and 2014-2018. According to the proposed optimization algorithm, the grid interval for the construction of a digital model of glacier surfaces is calculated, which will provide the determination of volume changes with an accuracy of 1%. The results of approbation of the algorithm for detecting not scanned area of terrestrial laser scanning are presented and polygons are constructed, which serve as masks for construction the digital models of glacier surfaces according to terrestrial digital survey data. Data of field works were processed and point models obtained according to terrestrial laser scanning 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.

LIST OF PUBLICATIONS BY THE THEME OF DISSERTATION

1. Main scientific results of the thesis

Articles in scientific periodicals of Ukraine that are included in international science-computer databases

1. Hlotov, V., Marusazh, Kh. (2015). Optimization grid spacing for DEM construction in the determining the surface volume of the Antarctic coast island glacier. *Geodesy, Cartography and Aerial Survey*, 82, 95-109. (*Index Copernicus*).
2. Hlotov, V., Marusazh, Kh (2019). Accuracy investigation of point clouds with Faro Focus 3D S120 terrestrial laser scanner. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 90, 41–49. (*Index Copernicus*)

Articles in scientific professional editions of Ukraine

1. Hlotov, V., Marusazh, Kh. (2013). Analysis of methods for creating frontal plans by laser ground scanning and digital surveying. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 78, 30-37.
2. Marusazh, Kh. (2014). Analysis of modern methods for studying the quantitative parameters of glaciers. *Modern achievements of geodesic science and industry*, 27(1), 109-117.
3. Hlotov, V., Marusazh, Kh. (2016). Method of determining focal length of digital non-metric camera. *Modern achievements of geodesic science and industry*, 31(1), 105-110.
4. Hlotov, V., Marusazh, Kh. (2019). Method of determining focal length of digital non-metric camera. *Modern achievements of geodesic science and industry*, 37(1), 85-90.

Publications in scientific editions of other countries, which are included in international science-computer databases

3. Tretyak, K., Hlotov, V., Holubinka, Y., & Marusazh, K. (2016). Complex geodetic research in Ukrainian Antarctic station “Academician Vernadsky” (years 2002-2005, 2013-2014). *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 100(1), 149-163. (*Web of Science*).
4. Hlotov, V., Marusazh, K., & Siejka, Z. (2019). The Proposal of Determining the Focal Length of a Non-Metric Digital Camera for UAV. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 603, No. 2, p. 022050). IOP Publishing. (*Scopus*).

Patents

1. Hlotov, V., Marusazh, Kh. (25.10.2016). *The utility model patent № 110910 Україна, МПК UA G01C 11/00*. Method of determining the focal length digital imaging camera. № u 2016 03935; filed 11.04.2016 p., Bul. №20.
2. Hlotov, V., Marusazh, Kh. (25.07.2019). *The utility model patent №135876 Україна, МПК UA G01C 11/00*. Method of determining the focal length digital imaging camera. № u 2019 01125; filed. 04.02.2019 p., Bul. №14.

2. Publications that testify to the approbation of the thesis materials, namely the materials and abstracts of international and national scientific and technical conferences

1. Tretyak, K., Hlotov, V., Holubinka, Y., Marusazh, Kh. (2013, September). The results of determining the surface volumes of island glaciers of the Antarctic coast by a complex method. In *Collection of scientific works. XVIII International Scientific and Technical Symposium "Geoinformation Monitoring of the Environment: GNSS and GIS - Technologies"* (pp. 9-16).
2. Hlotov, V., Marusazh, Kh. (2016). Method of determining focal length of digital non-metric camera. In *Conference program and abstracts. 21st International Scientific and Technical Conference "Geoforum-2016"* (pp. 40-41).

3. Hlotov, V., Marusazh, Kh. (2016). Method of increasing accuracy of construction of digital model of surface of exits of island glaciers of Antarctic coast. In *Proceedings of the conference International Scientific and Technical Conference of Young Scientists "GeoTerrace-2016"* (pp.117–121).
4. Hlotov, V. M., Marusazh, Kh. I. (2019). Method of determining focal length of digital non-metric camera. In *Abstracts. 24th International Scientific and Technical Conference "Geoforum-2019"* (pp.38-39).
5. Hlotov, V., Marusazh, K., & Siejka, Z. (2019, June). The Proposal of Determining the Focal Length of a Non-Metric Digital Camera for UAV. In *Abstract Collection Book "World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium"* (pp. 369)
6. Hlotov, V., Marusazh, Kh. (2019, September). Accuracy investigation of create points cloud with Faro Focus 3D S120 terrestrial laser scanner. In *9th international scientific-technical conference "Environmental Engineering, Photogrammetry, Geoinformatics – Modern Technologies and Development Perspectives"* (pp. 81-82).
7. Marusazh, Kh., Hlotov, V. (2020). The results of monitoring the outcrops of Galindez and Winter glaciers in 2018-2019. In *Proceedings of the 25th International Scientific and Technical Conference "Geoforum-2020"* (pp.40-43).

3. Publication that additionally reflect the scientific results of the dissertation

1. Marusazh, K. I., Hlotov, V. M., & Siejka, Z. (2019). Monitoring of glacier frontal parts on Galindez and Winter islands (the Argentine Islands) in 2018—2019. *Ukrainian Antarctic journal*, 2 (19), 26-37.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	14
ВСТУП.....	15
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ КІЛЬКІСНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛЬОДОВИКІВ	22
1.1 Процес формування льодовиків	22
1.2 Аналіз досліджень антарктичного регіону	24
1.3 Контактні методи дослідження льодовиків.....	31
1.4 Дистанційні методи дослідження льодовиків	33
1.5 Задачі дисертаційної роботи	48
1.6 Висновки до розділу 1	49
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА СПОСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ ФОКУСНОЇ ВІДДАЛІ ЦИФРОВОЇ НЕМЕТРИЧНОЇ ЗНІМАЛЬНОЇ КАМЕРИ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНЕРА	50
2.1 Способи визначення фокусної віддалі цифрової неметричної знімальної камери.....	51
2.2 Дослідження дисторсійних спотворень цифрової неметричної знімальної камери.....	71
2.3 Дослідження точності побудови хмари точок методом наземного лазерного сканування.....	77
2.4 Висновки до розділу 2	91
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІН ПОВЕРХНЕВИХ ОБ'ЄМІВ ОСТРІВНИХ ЛЬОДОВИКІВ	93
3.1 Створення технічного проєкту	93
3.2 Польові роботи наземного лазерного сканування та наземного цифрового знімання	103

3.3	Камеральне опрацювання матеріалів наземного лазерного сканування та наземного цифрового знімання	105
3.4	Визначення змін поверхневих об'ємів.....	113
3.5	Висновки до розділу 3	114
РОЗДІЛ 4 АПРОБАЦІЯ МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІН ПОВЕРХНЕВИХ ОБ'ЄМІВ ЛЬОДОВИКІВ.....		116
4.1	Опрацювання даних наземного лазерного сканування	116
4.2	Опрацювання матеріалів наземного цифрового знімання.....	125
4.3	Визначення змін поверхневих об'ємів.....	128
4.4	Перспективи вдосконалення методики.....	132
4.5	Висновки до розділу 4	137
ВИСНОВКИ		139
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....		141
Додаток А		166
Додаток Б.....		169
Додаток В		171
Додаток Г		176

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

БПЛА – безпілотний літальний апарат.

ГІС – геоінформаційна система

ГНСС – глобальна навігаційна супутникова система.

ЕВнО – елементи внутрішнього орієнтування.

ЕЗО– елементи зовнішнього орієнтування.

КВС– контрольна-вимірна сітка.

НЛС – наземне лазерне сканування.

НЦЗ – наземне цифрове знімання.

ПП – програмний пакет

РСА – радіолокаційні системи з синтезованою апертурою

СКП – середня квадратична похибка.

ЦМР – цифрова модель рельєфу.

ЦНЗК – цифрова неметрична знімальна камера.

ЦФС–цифрова фотограмметрична станція.

GPS – глобальна система позиціонування.

ISO – International Standards Organization (чутливість сенсора камери до світла)

SRTM – Shuttle Radar Topography Mission (радіолокаційна топографічна місія шаттла)

TIN – triangulation irregular network (нерегулярна триангуляційна мережа).

ВСТУП

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. Як стверджують науковці (Lee, 2007, Stocker et al., 2013, NASA, 2020), домінуючим чинником на зміни клімату є діяльність людини і саме цей чинник є основною причиною потепління, яке спостерігається протягом останніх 50 років (Barrand, 2013, Cook&Vaughan, 2010). Крім того, в кліматичній системі існує безліч механізмів зворотного зв'язку, які можуть або підсилити або послабити ефекти кліматичних змін. Наприклад, внаслідок потепління клімату Землі сніговий та льодовий покрив починають танути. В результаті цього танення оголюються темніші земні та водні поверхні, які раніше були вкриті снігом та льодом. Цей механізм зворотного зв'язку, відомий як «зворотний зв'язок між льодовим покривом та альбедо» підсилює початкове потепління (Stocker et al., 2013).

Отже, сучасне материкове зледеніння прямо й опосередковано позначається на природі географічної оболонки Землі. Це виявляється у співвідношенні суші і моря, яке залежить від змін об'єму льоду. Зледеніння впливає на клімат планети, знижує середні температури повітря південної півкулі і загалом планети, посилює термічну зональність на Землі. Зміна маси льодовиків значно впливає на гравітаційне поле, швидкість обертання Землі, тривалість дня (Dyurgerov, 2010).

Окрім сприятливого впливу, льодовики можуть бути причиною несприятливих процесів, явищ і надзвичайних ситуацій. Вже тепер спостерігається відступ льодовиків в горах та посилене танення криги в Антарктиді й Арктиці. Це у свою чергу стане причиною підняття рівня Світового океану й затоплення великих прибережних територій. До того ж повсюдно зміняться погодні умови, що призведе до змін довкілля (Oliva, 2017).

Оскільки льодовиковий покрив Антарктики є складною природною системою з внутрішньою динамікою, чутливою до атмосферних і океанічних впливів, глибше розуміння властивостей цих процесів, матимуть вирішальне значення для поліпшення прогностичних моделей. Кліматичні зміни і пов'язані з

цим ризику, зокрема збільшення кількості природних катаклізмів, що важко піддаються прогнозуванню, – це ті проблеми, на вирішення яких спрямовані проведення комплексних наукових досліджень в Антарктиці, оскільки вона є важливим кліматоформуєчим чинником для всієї Землі (Литвинов & Федчук, 2014).

Спостереження за динамікою льодовиків Антарктиди дасть змогу виявити кліматичні, гляціологічні та біологічні зміни, що відбуваються. На основі дослідження льодовиків антарктичного регіону з'являється можливість створення геоінформаційної системи динаміки кріосфери, яка віддзеркалює зміни клімату на всій планеті. Тому актуальним є моніторинг льодовиків, зокрема, антарктичного узбережжя і в першу чергу острівних льодовиків. Це дозволить отримати цінну інформацію для прогнозування змін клімату не тільки у даному регіоні, а й для всієї планети.

На сьогодні для моніторингу льодовиків створено багато міжнародних та національних організацій, серед яких Всесвітня служба моніторингу льодовиків (World Glacier Monitoring Service), Міжнародна гляціологічна спільнота (International Glaciological Society), Науковий комітет з Антарктичних досліджень (Scientific Committee on Antarctic Research), Британська Антарктична служба (The British Antarctic Survey) та інші. В Україні існує Державна установа Національний антарктичний науковий центр, до напрямків роботи якої належать дослідження в Антарктиці та у сфері захисту довкілля.

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 невирішеним питання щодо комплексного застосування методів.

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 спостережень за льодовиками 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 (Марусаж, 2014). У співавторстві автору належить (Глотов & Марусаж, 2013) – аналіз методів наземного лазерного сканування та цифрового знімання; (Глотов & Марусаж, 2015, 2016) – розробка алгоритму оптимізації інтервалу сітки для побудови ЦМР, підвищення його точності та апробація; (Третьак, Глотов, Голубінка & Марусаж, 2013, Tretuyak, Hlotov, Holubinka & Marusazh, 2016) – опрацювання матеріалів наземного лазерного сканування та цифрового знімання та аналіз результатів; (Hlotov, Marusazh & Siejka, 2019 a, 2019 b, Глотов & Марусаж, 2016 a, 2016 b, 2019 a, 2019 b, Патент на корисну модель № 110910, 2016, Патент на корисну модель № 135876, 2019) – розробка способів визначення фокусної віддалі та їх апробація; (Hlotov, Marusazh, 2019 a, 2019 b) – дослідження точності побудови хмари точок та аналіз отриманих результатів, (Marusazh, Hlotov & Siejka, 2019, Марусаж & 2020 Глотов) – 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:

- 1) VII Міжнародній науково-технічній конференції «Кадастр, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології та перспективи розвитку», 13- 15 червня 2013 р., м. Львів.
- 2) XVIII Міжнародному науково-технічному симпозиумі «Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GNSS і GIS – технології», 10-15 вересня 2013 р. м. Алушта, АР Крим.
- 3) XVIII Міжнародній науково-технічній конференції «Геофорум-2013». 24-26 квітня 2013 р., Львів-Яворів.
- 4) XIX Міжнародній науково-технічній конференції «Геофорум-2014». 23-25 квітня 2014 р. Львів-Яворів.
- 5) XX Міжнародній науково-технічній конференції «Геофорум-2015». 22-24 квітня 2015 р. Львів- Брюховичі-Яворів.
- 6) XXI Міжнародній науково-технічній конференції «Геофорум-2016». 13-15 квітня 2016 р., Львів-Брюховичі.
- 7) Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «GeoTerrace-2016», 15-17 грудня 2016 р., Львів.
- 8) XXIV Міжнародній науково-технічній конференції «Геофорум-2019». 10-12 квітня 2019 р., Львів-Яворів-Брюховичі.
- 9) 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.
- 10) World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium, 17-21 June 2019, Prague (Czech Republic).
- 11) 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 оприлюдненні 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.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ КІЛЬКІСНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛЬОДОВИКІВ

Льодовики, залежно від їх типу, форми, розмірів та розташування досліджують з застосуванням різних методів чи їх комбінування.

1.1 Процес формування льодовиків

Льодовики утворюються в результаті перевищення накопичення твердих опадів (аккумуляція) над їх таненням, стоком і випаровуванням (абляцією). Як правило, накопичення формуються снігопадами, вітровим дрейфовим потоком і лавинами, іноді через паморозь і мороз або заморожування дощу чи талої води в сніговому покриві. Абляція може бути викликана таненням, сублімацією або вітровою ерозією, сходженням льоду з лавин або льодопадів, або ж відколом айсбергів. Перетворення снігу на лід складається з таких стадій: ущільнення снігового покриву (діагенез), перетворення снігу на фірн, і перетворення фірну на лід. Діагенез снігового покриву відбувається переважно за рахунок осідання снігу та перекристалізації або ж внаслідок затримки води на поверхні снігу (Molnia, 2004). Наступна стадія ущільнення - перетворення снігу на фірн, тобто подальше ущільнення снігу. За певний час, що може тривати в горах від кількох місяців до одного року, сніг перетворюється на фірн (Glacier processes, 2018).

Після ущільнення лід і сніг нарощуватиметься, поки не стане досить товстим, щоб деформуватися під власною вагою і рухатися вниз. Лід буде продовжувати свій низхідний потік, поки не досягне висоти снігової лінії. У цьому випадку льодовик досягне стійкого стану і стаціонарного розміру і форми.

Процеси, що формують накопичення, льодохід та абляцію взаємодіють багатьма способами, що роблять клімат і рельєф вирішальними чинниками для визначення розміру і форми льодовика. Отже, основна причина виникнення та існування льодовиків – клімат, тобто додатний сніговий баланс і тривалий період існування від'ємних температур повітря (Glacier processes, 2018).

Крім кліматичних умов, утворенню льодовиків сприяють і геоморфологічні умови (значна висота, експозиція схилів, орієнтація гірських хребтів відносно руху повітряних мас, пологі чи увігнуті форми рельєфу, де міг би затримуватись сніг). Розвитку зледеніння сприяє сукупність метеорологічних елементів, що наближає клімат місцевості до океанічного типу (Glacier processes, 2018).

Льодовики відіграють значну роль у географічній оболонці Землі (Dyurgerov, 2010). Вони істотно впливають на рельєф, кліматичні і погодні умови. Гідрологічна роль льодовиків полягає в перерозподілі стоку атмосферних опадів всередині року й у згладжуванні коливань річних водотоків. У льодовиках зосереджено 39890 тис. км³ прісної води, приблизно 110 тис. км³ – формується щорічно (USGS, 2018).

Найважливіше значення льоду для клімату планети пов'язано з високим альбедо – 40 % (для снігу, що покриває льодовики – 95%). Завдяки цьому відбувається істотне охолодження поверхні на величезних територіях. Тобто, льодовики не тільки неоціненні фонди прісної води, але і джерела охолодження Землі (USGS, 2018). Результати досліджень, щодо зміни об'ємів льодовиків на всій поверхні Землі подано на рис. 1.1 (Dyurgerov, 2010).

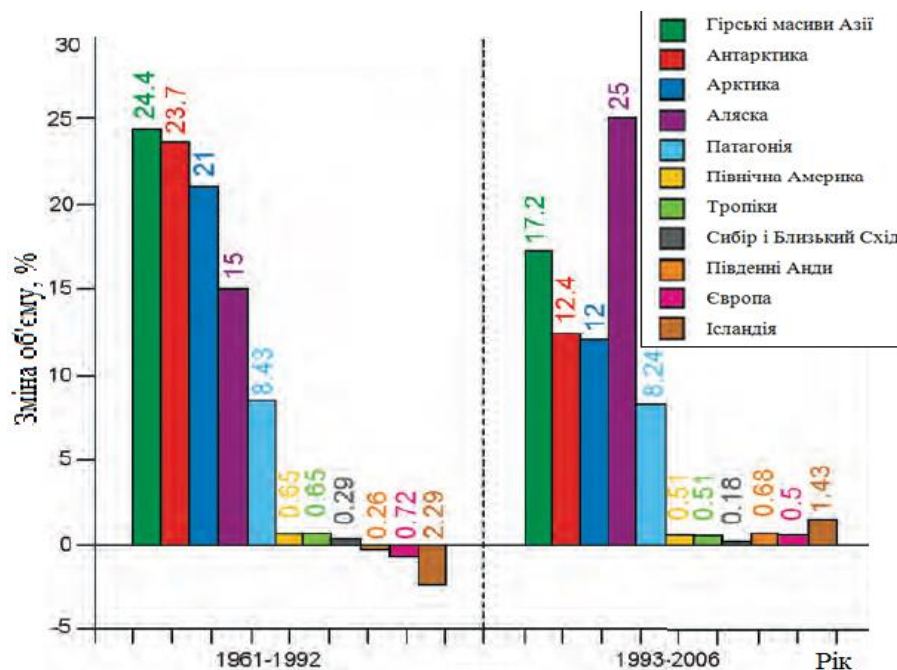


Рис. 1.1 Вклад регіональних змін в глобальні упродовж 1961-1992 р.р. і 1993-2006 років: зміна об'єму льоду

Окрім сприятливого впливу льодовики можуть бути причиною несприятливих процесів, явищ і надзвичайних ситуацій, зокрема спричиняти катастрофічні повені та селі. Серйозну загрозу становлять айсберги.

Відступ і швидке танення льодовиків позначилось на туризмі і рекреації в горах, річковому стоці, водних ресурсах, сільському господарстві, а також викликали катастрофічні процеси на багатьох гірських хребтах.

1.2 Аналіз досліджень антарктичного регіону

Процеси, що протікають в атмосфері, кріосфері та Південному океані, пов'язані з процесами в інших частинах планети і впливають на глобальний клімат. Антарктика є складовою частиною кліматичної системи Землі, а її льодовиковий покрив – складною природною системою з внутрішньою динамікою, чутливою до атмосферних і океанічних впливів (Гожик, Литвинов & Маланчук, 2015). Глибше розуміння властивостей цих процесів матимуть вирішальне значення для поліпшення прогностичних моделей змін клімату.

Антарктида містить об'єм льоду, який переводиться в еквівалент рівня моря як 57,2 м. Річний внесок снігопаду становить 2100 Гт, за винятком шельфових льодовиків, що еквівалентно 5,8 мм коливанню рівня моря (Noël et al., 2018, Wessem et al., 2018). У стані масової рівноваги накопичення снігопадів повинно врівноважувати поверхневу абляцію та льодовідведення по периферії в Південний океан. Проте, загальна втрата маси льодовикового покриву Антарктиди зросла з 40 ± 9 Гт / рік у 1979–1990 роках до 50 ± 14 Гт / рік у 1989–2000 роках, 166 ± 18 Гт / рік у 1999–2009 роках та 252 ± 26 Гт / рік у 2009–2017 роках (Rignot et al., 2019). Вклад льодовиків Антарктиди у підвищення рівня моря з в середньому становив $3,6 \pm 0,5$ мм на десятиліття з накопиченням $14,0 \pm 2,0$ мм з 1979 р., у тому числі $6,9 \pm 0,6$ мм – льодовиків Західної Антарктиди, $4,4 \pm 0,9$ мм – льодовиків Східної Антарктиди та $2,5 \pm 0,4$ мм – льодовиків Антарктичного півострова (АП).

Причиною глобальних втрат крижаного покриву є зміна клімату. Значна зміна клімату, а саме, істотне потепління, зареєстровано в районі Антарктичного півострова. Кінець ХХ століття характеризується підвищенням поверхневих

температур, посиленням танення льодовиків та збільшенням снігопаду (Thomas&Tetzner, 2018). Тенденції потепління на континенті зосереджені на західній та північній частинах Антарктичного півострова, регіоні, що демонструє найбільшу міжрічну мінливість на всьому континенті (Turner et al., 2014). Варто зазначити, що найбільш статистично значуща тенденція $+ 0,54^{\circ}\text{C}$ на десятиліття спостерігається на станції «Академік Вернадський» (1951–2011). Середньорічна температура повітря за 50 років зросла тут майже на 5°C , що набагато перевищує аналогічні величини для інших регіонів Південної півкулі. Спостереження за температурою та концентрацією солі морської води в районі архіпелагу Аргентинські острови, які розташовані біля Антарктичного півострова, свідчать про значне їх зростання в літній період (Kovalenok, Milinevsky & Shanklin, 2004). Це спричинило танення острівних льодовиків, які виникли на цих островах понад 10 тис. років тому (Kovalenok et al., 2004, Wessem et al., 2018).

Таке підвищення температури повітря пов'язане з послідовністю гляціологічних подій на АП протягом 90-х років (Silva et al., 2014), таких як відколення крижаних мас, фрагментація шельфових льодовиків (Kunz et al., 2012), зміна висоти снігової лінії, обвал та танення шельфових льодовиків (Cook et al., 2005; Cook et al., 2014). Зміни, що спостерігаються, вказують на те, що АП швидко реагує на кліматичні зміни. Однак зміни є нерівномірними по всьому регіону (Shepherd et al., 2012).

Найхарактерніші зміни виявлено на північній частині АП (Zanutta et al., 2018), менші – на західній частині півострова та островів. З точки зору зменшення площ, найбільших втрат зазнали шельфові льодовики. За спостереженнями (Silva et al., 2020), 60% льодовиків АП перебувають у процесі зменшення, 25% – розширення та 7% – коливання. Танення більшості льодовиків підтверджує, що АП втрачає більше льодовикової маси, ніж набирає, тому процес не збалансований (Cook et al., 2014).

Північно-західний регіон зазнав найбільш виражених змін на АП. 74% льодовиків зменшились за період 2000–2015 р.р. З 94 льодовиків 69 втрачають

фронтальну площу, 80 – вивідні льодовики, тобто 85% з них більш чутливі до фронтальних змін (Silva et al., 2020).

У західному регіоні АП через поступове підвищення температури повітря відбулися найбільші зміни висоти лінії сухого снігу між 1995 і 2005 роками. Дослідження, де аналізували 244 льодовики на західному узбережжі АП показали, що між 1945 та 2004 рр. приблизно 87% зменшились (Cook et al., 2005) (рис. 1.2).

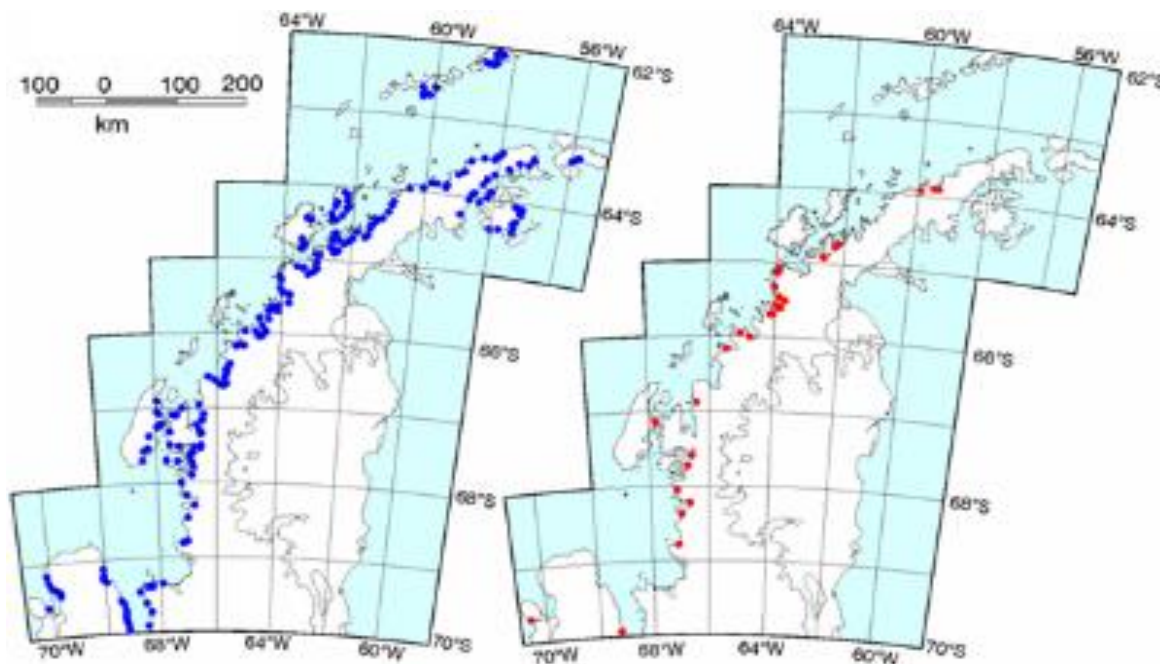


Рис. 1.2 Відступ льодовиків Антарктичного півострова за останні 50 років

Незважаючи на тенденції регіонального потепління в західному регіоні АП наприкінці ХХ століття, середня річна температура з 1990-х (1999–2014 рр.) знизилася зі статистично значущими темпами (<5%) (Turner et al., 2016). Тенденція зменшення приросту значень температури (рис. 1.3) спостерігається також на станції «Академік Вернадський» (2000–2019 р.р.) (Antarctic meteorology online from the British Antarctic survey, 2019).

Припускають, що швидке потепління з 1950-х років і подальше зменшення значень приросту температури з кінця 1990-х років не пов'язані з чинником глобальної зміни температури (Smith & Brown, 2009), а скоріше, відображають внутрішню природну мінливість регіональної циркуляції атмосфери (Thomas & Tetzner, 2018). Ці висновки підкреслюють необхідність більш тривалих

спостережень за даними температури та іншими метеорологічними показниками для оцінки регіональної мінливості клімату (Sobota et al., 2015).

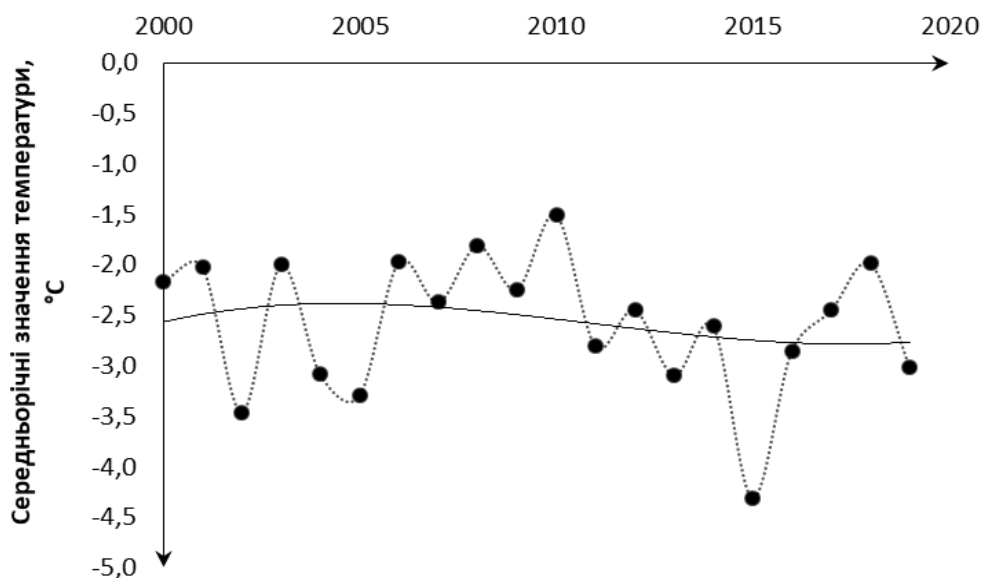


Рис. 1.3 Середньорічні температури на станції «Академік Вернадський» за період 2000–2019 р.р.

Зміна клімату може спричинити втрати крижаної маси, що призводить до підвищення рівня моря. Для виключення впливу цього чинника враховують короткочасні коливання снігонакопичення при вимірюванні зміни висоти крижаного покриву (Shepherd et al., 2019). Науковці відзначають, що тенденція накопичення снігового покриву спостерігається найбільше на АП (Thomas et al., 2017). Збільшення снігового покриву має негативний вплив на результати досліджень засобами дистанційного зондування Землі. Тому, для уточнення результатів необхідно виконувати польові виміри (Wang et al., 2017).

Для виявлення і передбачення кліматичних, гляціологічних та біологічних змін, що відбуваються в даному регіоні та оцінки антропогенного впливу на зміни, необхідно дослідити динаміку танення льодовиків (Raphael et al., 2016).

Коротко проаналізуємо праці, в яких висвітлюються дослідження льодовиків Антарктичного півострова.

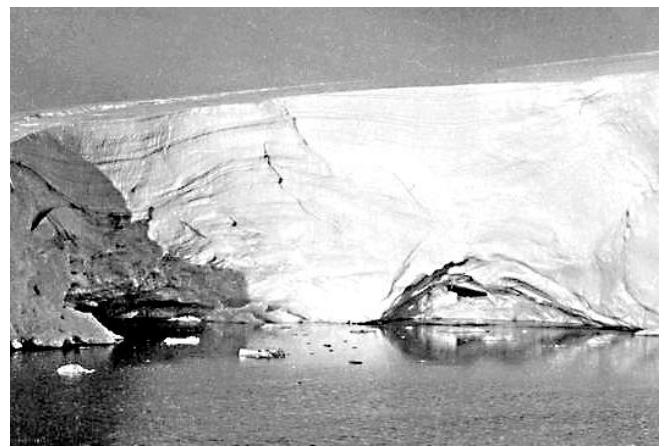
Перші гляціологічні дослідження на території Антарктичного півострова були розпочаті польським метеорологом Генріхом Арцтовським в 1900 р. для льодовиків островів Затоки Фландрії. В 1908 р. (Gourdon, 1908) гляціологічні

дослідження були проведені на острівних льодовиках островів Петерман та Бот (Thomson & Harris, 1981).

Протягом 1935 – 1936 р.р. вченими Британської антарктичної експедиції проводилися метеорологічні вимірювання в регіоні Аргентинських островів, а також гляціологічні дослідження західного узбережжя Землі Грехема. За результатами цих спостережень (Fleming, 1940) було встановлено, що прибережні льодовики мають походження від льодового куполу, який на цей момент зменшився до кількох невеликих шельфових льодовиків. Фотографії західної частини льодовика о. Галіндез подано на рис. 1.4.



a)



б)

Рис. 1.4 Знімки західної частини льодовика о. Галіндез: а) 1935 р.; б) 1936 р.

Починаючи з 1960 р., на території одного з найбільших островів Аргентинського архіпелагу – о. Галіндез було розпочато англійськими вченими детальні гляціологічні дослідження (Thomas, 1963) на основі, яких визначали баланс мас льодовиків, вимірювали рухи льодовиків, температуру снігового покриву, визначали джерела акумуляції та чинники, що призводять до абляції льодовикових мас.

У роботі (Corner & Smith, 1973) зазначається, що джерелами накопичення льодовикових мас були снігові нанесення, опади, а також вплив сублімації. Основними чинниками абляції визначають вітрову та дрейфову ерозії, танення снігової поверхні та танення льоду на скелях.

Гляціологічні дослідження льодовиків Аргентинських островів продовжено під час Британських Антарктичних експедицій в 1964 – 1966 р.р. (Sadler, 1968). Зокрема на островах Галіндез і Вінтер (рис. 1.5), на яких лід охоплює відповідно 40 і 50 відсотків їх загальної площі, виконували періодичні виміри товщини снігового покриву, величини абляції снігу та рухів льодовиків.

Дослідження на о. Галіндез показали, що для трьох частин льодовика була накопичена приблизно однакова кількість снігової маси і накопичення снігу істотно не змінюється з висотою над рівнем моря (Sadler, 1968).



Рис. 1.5 Панорама льодовика о. Вінтер 1966 р.

Результати вимірювань свідчать про те, що більша частина льодовикового куполу о. Галіндез зазнає незначних рухів. У той же час, подальші дослідження у зонах максимальних зміщень дали можливість оцінити середньорічні зменшення льодовика: на 9 см водного еквіваленту. Ця величина є лише частиною повного руйнування льодовика, оскільки інша частина абляції складалася в основному з стоків і дрейфу не ущільненого снігу (Sadler, 1968).

Одними з можливих причин зміщень льодовика вважають ослаблення основного льоду за рахунок пластичної деформації. В результаті відбувається ковзання нижньої поверхні льодовика із неоднорідною швидкістю по тріщинуватій поверхні корінних порід, внаслідок чого з'являються великі тріщини у тілі льодовика. Утворені тріщини знаходяться під прямим кутом до напрямку руху льодовика і розбивають його на блоки близькі до прямокутної форми (Corner & Smith, 1973).

Подальший моніторинг льодовиків архіпелагу Аргентинські острови продовжено в 2002 р (Глотов, Ковальонок & Чижевський, 2004). Застосування методу наземного цифрового знімання запропоновано в публікаціях (Dorozhynskyy, Milinevskyy & Hlotov, 2004, Глотов, 2005, 2006). Польові виміри передбачали такі етапи: рекогностування ділянки та складання робочого проєкту; закріплення контрольних та базисних точок, визначення їх геодезичних координат; встановлення довгострокових центрів; знімання льодовиків; визначення місцеположення центрів знімання за допомогою GPS спостережень у статичному режимі. Камеральна обробка даних полягала у опрацюванні цифрових знімків на цифровій фотограмметричній станції (ЦФС) Дельта-2.

Автори акцентують увагу на тому, що при виконанні дослідження виникали труднощі у маркуванні опорних точок, особливо на виходах льодовиків. Частково задачу вирішували встановленням марок на краях льодовикової поверхні, але цього було недостатньо для подальшого орієнтування знімків на ЦФС. Для контролю було виконано геодезичні роботи й отримано координати опорних точок за контрольними напрямками. Точність визначення зміни поверхневого об'єму при нормальному випадку знімання склала 0,1% (Глотов, 2005).

Запропонована технологічна схема дозволила оперативно і з необхідною точністю розв'язати задачу визначення змін об'єму як методом пікетів, так і методом вертикальної сітки (Глотов, 2006).

В 2013 р вперше виконано наземне лазерне сканування для моніторингу острівних льодовиків антарктичного узбережжя. За результатами НЦЗ виконаного у попередні роки (2002-2005 р.р.) та дослідженнями у 2013 р. було встановлено зміни поверхневого об'єму льодовиків та їх кінематичні характеристики (Третяк, Глотов & Голубінка, 2013 а, Третяк, Глотов & Голубінка, 2013 б, Третяк, Глотов, Голубінка & Марусаж, 2013).

Однак, виникає питання, чим обумовлена необхідність спостережень за рухом, деформаціями та геометричними параметрами острівних льодовиків? Як з'ясували гляціологи, острівні льодовики дуже «чуттєво» реагують на зміну навколишньої температури, і фактично є «лакмусовим папірцем» за допомогою

якого можливо робити об'єктивні прогнози щодо зміни клімату не тільки у даному регіоні, а й на поверхні всієї планети (Третьяк, Глотов & Голубінка, 2013 b). Практично за останні 50 років 244 льодовики по західному узбережжю Антарктичного півострова зменшилися в розмірах s (Cook et al., 2005). В тому числі, за результатами спостережень протягом 1956 – 2004 р.р. значно зменшився в розмірах льодовик на о. Галіндез (рис. 1.6).

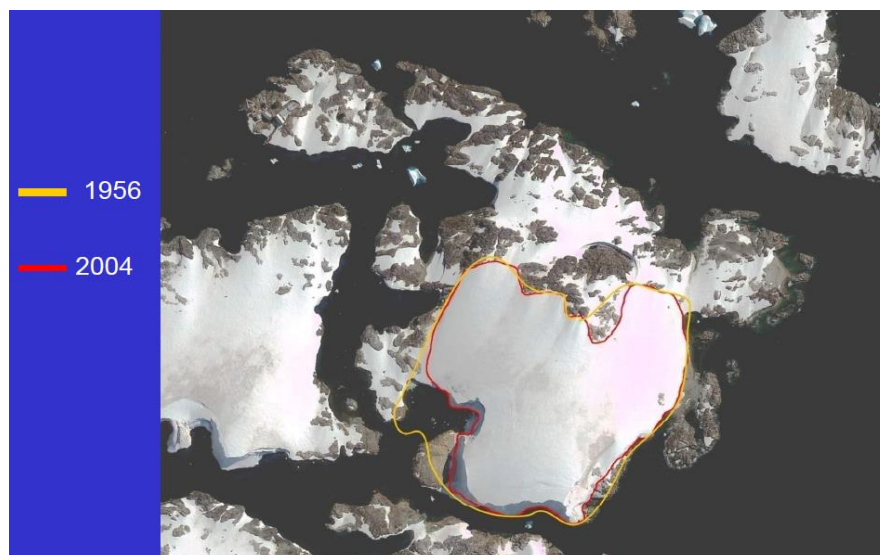


Рис. 1.6 Межі льодовика о. Галіндез в 1956 та 2004 р.р.

Отже, як бачимо дослідження динаміки змін кількісних параметрів льодовиків є досить важливою задачею для виявлення і передбачення майбутніх кліматичних, гляціологічних та біологічних змін, що відбуваються на Землі. Для вирішення таких завдань зазвичай застосовують гляціологічні, геодезичні методи та методи дистанційного зондування, які умовно розділимо на контактні та дистанційні методи.

1.3 Контактні методи дослідження льодовиків

До контактних методів дослідження льодовиків відносять гляціологічні та геодезичні методи.

Гляціологічні методи. Використання гляціологічного методу висвітлено в роботах (Hagg, Braun, Uvarov & Makarevich, 2004, Karpilo & Ronald, 2009, Dyurgerov, 2010). Цей метод ще називають прямим, традиційним або ж методом

«забурених» рейок (Hagg, Braun, Uvarov & Makarevich, 2004). Застосування такого підходу для моніторингу льодовиків Аляски описано в публікації (Karpilo & Ronald, 2009). Виміри виконують за допомогою рейок, які забурюють в поверхню льоду на початку і в кінці сезону спостережень. Для обчислення балансу мас у будь-якій точці визначають глибину снігу або льоду, що накопичився чи зменшився в кожній точці мережі, враховуючи їх щільність. Отримані значення інтерполюють, щоб отримати дані для всієї поверхні льодовика.

Проектна мережа складається зі станцій, що охоплюють весь льодовик і розподілені рівними інтервалами висот (не рівні по горизонталі). Проте, варто зазначити, що у багатьох випадках матеріально-технічні обмеження дозволяють розташовувати станції лише уздовж середньої лінії льодовика.

У дослідженні рейки були встановлені на льодовику шляхом свердління отворів (2-4 см в діаметрі і до 10 м в глибину) за допомогою парового дреля або ручного бура. Координати кожного пікета отримано з використанням приймача GPS. Значення абляції визначали за допомогою рулетки на початку і в кінці року.

У публікації (Dyurgerov, 2010) подано результати аналізу характеристик льодовиків (зміни площ, об'ємів та ін.). Для визначення абляції льодовикових покривів використовували гляціологічний метод «забурених» рейок.

Аналіз включав всі льодовики Землі, в тому числі периферійні льодовики двох основних льодовикових щитів Гренландії та Антарктиди. Отримані результати характеризують зміни гірських льодовиків і субполярних льодовикових куполів за останні 50 років. Проте тенденція змін неоднозначна для всіх льодовиків планети (Dyurgerov, 2010). Проаналізувавши ці праці, можна зробити висновок, що використання гляціологічних методів для спостережень за станом льодовиків потребує багато часу на виконання польових досліджень, а також для аналізу та статистики отриманих даних. Окрім того, використання методу не можливе у важкодоступних місцях на поверхні льодовика.

Геодезичні методи. Застосування геодезичного методу для моніторингу льодовиків подано в роботах (Hagg, Braun, Uvarov & Makarevich, 2004, Karpilo & Ronald, 2009). Підхід полягає у виконанні тахеометричної зйомки, спостережень

за допомогою GPS приймачів [Dietrich et al., 2001, Kaser, Fountain, Jansson, Heucke & Knaus, 2003.] або ж використанні картометричного методу (Kienzle, 2004, Krimmel, 1989). Зміну об'єму льодовиків можна оцінити шляхом врахування висоти поверхні та розмірів льодовика за різні моменти часу. Знаючи поверхневу щільність в різних частинах льодовика, можна отримати дані щодо зміни маси.

У роботі (Karpilo & Ronald, 2009) запропоновано методику застосування GPS спостережень для визначення зміщень та площі льодовиків Національного парку Аляски. Технологічна схема моніторингу за допомогою GPS приймача включала такі етапи: польові виміри, пост-опрацювання та геоінформаційний аналіз даних. Спостереження виконували як в статичному так і в кінематичному режимі. Наступним етапом був імпорт даних в геоінформаційну систему (ГІС) для перевірки та оцінки точності результатів. Будь-які точки, які відхилялися від загальної тенденції проаналізовано та виключено з набору даних. ГІС також використовували для порівняння положень виходів льодовиків.

Проаналізувавши вищезгадані роботи, потрібно зазначити, що подібні методики передбачають помірний рівень підготовки виконавців і незначний обсяг коштів. Проте, це дуже трудомісткий і неефективний, а з огляду охорони праці, у більшості випадків небезпечний метод моніторингу великих льодовиків (Triglav-Šekada & Zorn, 2013). Також варто зазначити, що на сьогодні геодезичний метод застосовують переважно для допоміжних вимірів, наприклад, для забезпечення геодезичної мережі.

1.4 Дистанційні методи дослідження льодовиків

Для моніторингу льодовиків широко використовують такі методи дистанційного зондування як аерознімання, повітряне лазерне сканування, космічне та радарне знімання (Pellikka & Rees, 2009).

Метод аерознімання. Використання архівних аерофотознімків для дослідження змін Антарктичного півострова запропоновано у публікації (Fox & Cziferszky, 2008). Для частини півострова ці дані є єдиним способом відновити зміни поверхні льодовика протягом останніх п'ятдесяти років. Тим не менш,

отримання інформації з архівних знімків не є простим завданням і до теперішнього часу це джерело даних практично не використовується. Часто такі зображення подано на фотопапері, що можуть деформуватися з часом. Інші труднощі пов'язані з недостатньою кількістю метаданих або опорних точок. Як правило, це призводить до неточної побудови різночасових цифрових моделей рельєфу, що негативно впливає на результати наступних вимірювань.

Варто зазначити, що основними обмеженнями в таких дослідженнях є якість зображення архівних знімків та використання знімків на фотопапері. Проте, результати дозволяють зрозуміти історичні зміни динаміки льодовиків.

Один з методів підрахунку балансу мас льодовиків ґрунтується на використанні високоточних ЦМР, отриманих методами дистанційного зондування. У праці (Haug, Rolstad, Elvehøy, Jackson, & Maalen-Johansen, 2009) пропонується поєднання даних аерофотознімання та лазерного сканування. За знімками було побудовано ЦМР для визначення балансу льодовикових мас західного Свартісену (Норвегія) упродовж 1968-1985 і 1985-2002 років. Основні труднощі полягали у визначенні та розпізнаванні опорних точок (Rolstad, Haug & Denby, 2009). Додаткові недоліки викликані відсутністю даних про танення, щільність та товщину фірну.

Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) як альтернативний варіант отримання даних для моніторингу льодовиків висвітлюється у публікаціях (Storvold, 2009, Schoenung & Albertson, 2011, Solbø & Storvold, 2013). Зміни довкілля внаслідок глобального потепління клімату, особливо чітко простежуються в полярних регіонах, які є ключем до розуміння процесів, що викликають зміни та їх наслідки для нашої планети. Однак, полярний регіон є важкодоступним для спостережень (Schoenung & Albertson, 2011). Одна з основних проблем для полярних дослідників це недостатня кількість даних, оскільки в цьому регіоні діють лише кілька постійних науково-дослідних станцій. Супутникові дані для полярного регіону мають певні обмеження: супутникового покриття на полюсах недостатньо, а застосування методу аерознімання в таких умовах є дорогим і в багатьох випадках дуже небезпечним через характер знімань

(низька висота, складні погодні умови). Це істотно обмежило використання повітряних суден у полярних дослідженнях в минулому.

У статтях (Storvold, 2009, Solbø & Storvold, 2013) акцентується увага на використанні БПЛА, що дасть можливість неперервних досліджень льодовиків. За час спостережень було виконано п'ять проєктів. Проте, варто зазначити, що для жодного з п'яти проєктів конкретної технології не було подано.

Можливість застосування БПЛА для вимірювання важкодоступних льодовиків Шпіцбергена досліджено у роботі (Solbø & Storvold, 2013). Висотний профіль льодовика отримали за допомогою системи, що складається з лазерного висотоміра FAE-LS1501 в поєднанні з високоточним двохчастотним GPS приймачем. Вихід льодовика відображено на цифрових знімках за допомогою стереомоніторів.

Точність профілю висот поверхні, отриманого за даними лазерного альтиметра, прямо пов'язана з точністю бортового GPS приймача (0,5 м). Середнє значення похибок після опрацювання даних з GPS приймача становило по горизонтальній осі 1,18 м, по вертикальній – 2,41 м. Опорні точки обирали на бічних моренах з обох сторін льодовика.

Потрібно наголосити, що в даній роботі використовували лазерний висотомір, що працював в надто короткому діапазоні, а висоти поверхні були достатньо низькі. Це спричинило труднощі при реєстрації даних. Тобто, важливим етапом дослідження є аналіз місцевості і вибір обладнання з відповідними технічними характеристиками.

Аналізуючи вищезгадані роботи, можна зробити висновок, що БПЛА може бути цінним інструментом та єдиною реальною альтернативою для дослідження льодовиків у віддалених районах. Отримані дані з повторних спостережень протягом деякого періоду у поєднанні з 3D моделюванням можуть бути використані для оцінки швидкості втрат динамічної маси. Такі дані є цінними, зокрема для льодовиків, що виходять в море та пульсуючих льодовиків.

Метод космічного знімання. Застосування методу космічного знімання висвітлено в працях (Khosbayara & Uranchimegb, 2006, Moussavi, Zoj, Sahebi &

Rezaei, 2008, Ferreira de Mendonça, 2012, Zhang, Wu, Jin & Wang, 2013). Моніторинг льодовиків Монголії як індикаторів кліматичних мінливостей і одних з найважливіших прісноводних ресурсів подано у праці (Khosbayara & Uranchimegb, 2006). Дослідження полягали у застосуванні даних MODIS snow product для визначення меж снігового покриву льодовиків. Для порівняння використовували інформацію з супутникової системи Landsat. Виконавці підкреслюють, що для отримання інформації про баланс снігового, льодового покриву та водних ресурсів існує необхідність дослідження не тільки супутникових і наземних даних, але також аналізу кліматичних даних, таким чином забезпечуючи синергетичний ефект.

У роботі (Ferreira de Mendonça, 2012) один з найбільших льодовикових покривів на планеті, що знаходиться в Південній Патагонії, нанесено на карту за допомогою набору зображень знімальної апаратури ETM+ космічного апарата Landsat 7, отриманих в 1973, 1976, 1979, 1986, 2005 і 2009 роках. Зображення відкалібровано від радіовипромінювань космічних об'єктів та їх відбивної здатності. Контрольована класифікація кожного зображення дозволила розпізнати межі снігу та льодовика. Карти створено з відміченими положеннями виходів льодовика. Результати порівнювалися з попередніми публікаціями Геологічної служби США і показали неоднозначну поведінку кожного з льодовиків.

Варто зазначити, що отримані дані не дають можливості прогнозувати подальшої тенденції змін льодовика.

У статті (Zhang, Wu, Jin & Wang, 2013) подано методику визначення зміни об'єму льодовиків Геладандонгу (Тибетське нагір'я). Для дослідження використовували ЦМР, створені за топографічними та SRTM даними, супутникові знімки ICESat, GLAS і Landsat 5. З допомогою зображень з Landsat, отриманих у 2000 і 2007 роках, визначали площі льодовиків; за ЦМР та SRTM обчислювали зміни товщини льодовиків. Для коригування даних SRTM застосовано дані з ICESat та GLAS. Зміну об'єму льодовиків визначали шляхом поєднання результатів зміни площ та перепадів висот.

Аналізуючи дану статтю, варто підкреслити, що в роботі розглядається тільки період досліджень (2000-2007 р.р.) і немає посилань на раніше отримані дані для цього регіону. Результати свідчать, що кожен з досліджуваних параметрів (переміщення, площа і об'єм) льодовиків змінюється по-різному, як в негативну, так і в позитивну сторону, тобто важко розпізнати тенденцію змін.

Використання космічних знімків для моніторингу льодовиків Ірану описано у статті (Moussavi, Zoej, Sahebi & Rezaei, 2008). Для дослідження обрано знімки з супутникових систем SPOT 5 (2003 р.) і Quickbird (2005 р.). Для опрацювання знімків застосовано підхід взаємної кореляції зображень. Слід зазначити, що в процесі виконання дослідження виникали труднощі, пов'язані з відображенням схилів поверхні льодовика, наявністю тіней та інших шумів на знімках.

Радарні методи спостережень ґрунтуються на використанні відбитих від земних об'єктів хвиль у мікрохвильовому діапазоні. Застосування такого підходу розглядається у статті (Zhou, Dongchen, Wang & Sun, 2008). Дослідження виконували з використанням РСА (радіолокаційних систем з синтезованою апертурою антени), оптичних та альтиметричних даних для виявлення зміни поверхні та швидкості руху льодовика в горах Гров (Східно-Антарктичний льодовиковий щит). Автори підкреслюють, що досі важко отримати ЦМР всього масиву гір, який становить близько 8000 км², оскільки поверхня є похилою.

Слід зазначити, що застосована методика дозволяє обчислити параметри льодовиків за окремими джерелами даних та виконувати моніторинг обширних територій, а також класифікувати поверхню льодовиків (сніг, лід, гірська порода). Однак, технологічна схема комплексного використання даних ще не опрацьована.

Метод радарного знімання. Результати моніторингу льодовиків на острові Галіндез (Аргентинські острови) упродовж 2017-2018 р.р. подано у статтях (Chernov, 2017, Chernov, Lamsters, Karušs, Krievāns & Otruba, 2018). Дослідження полягали в застосуванні радарних методів. Вимірювання на льодовику виконували радаром VIY3-300 (300 МГц) щомісяця з квітня 2017 року. Після першого року моніторингу VIY3-300 був затверджений як належне обладнання для індикації та дослідження неоднорідностей (тріщин, міжльодовикових каналів,

пустот, шарів льоду, кордону лід-скеля) льодовика в суворих умовах Антарктиди. Застосування антенної системи Зонд 12-е (75 МГц) дозволило ідентифікувати межі льодовикової породи. Натомість дослідження внутрішньої структури льодовика таким способом не було настільки успішним. Для подальшого моніторингу льодовика на острові Галіндез автори рекомендують використовувати GPR VIY3-300 та акцентують на важливості продовження таких наукових спостережень в майбутньому, оскільки зміни острівних льодовиків в Антарктиці є показниками глобального потепління в цьому регіоні. Потрібно зазначити, що точність отримання даних в роботі не зазначається.

Застосування даних поляриметричних РСА (PolSAR) для моніторингу льодовиків запропоновано у публікації (Erten, Rossi & Hajnsek, 2012). Автори зазначають, що незважаючи на ряд останніх досліджень, присвячених моніторингу льодовиків, потенціал поляриметрії не було достатньо використано через складний механізм лід/ сніг. У статті пропонується підхід моніторингу льодовиків за допомогою зображень PolSAR, що базується на отриманні статистичних залежностей між поляриметричними зображеннями.

У статті (Fang, Maksymiuk, Schmitt & Stilla, 2013) описано визначення площі поверхні льодовика Таку (Аляска) за допомогою космічних РСА. Запропонований метод полягає у поєднанні різночасових даних маршрутних карт супутника TerraSAR-X. Для класифікації поверхні та обчислення площі льодовика використовували карти когерентності, текстурну інформацію, а також дані про швидкість переміщення льодовика.

Варто зазначити, що класифікували не всю поверхню льодовика, що пов'язано з виникненням шумів та недостатньою кількістю інформації в деяких зонах знімків. Також, варто зазначити, що до знімків застосовували наближений метод опрацювання, тому як результат розраховано наближену площу.

Точний моніторинг льодовика має важливе значення для оцінки глобальних екологічних змін. У працях (Tiana, Lia & Zhua, 2011, Wu, Zhang, Zhang, Lu & Zhong, 2012) використовували знімки інтерферометричних РСА для отримання інформації про поверхню льодовика. Основними завданнями було виправити

спотворення, притаманні зніманню PCA, і зобразити варіації руху льодовика. У роботі (Tiana, Lia & Zhua, 2011) методи корекції зображень полягали у використанні комплексного аналізу поляриметричних даних для уточнення визначення місця розташування і нормалізації розміру пікселя для кожного елемента матриці когерентності. Крім того, після радіометричної корекції корегували відображення крутизни схилів. Контрольовану класифікацію виконували на ортотрансформованих зображеннях для картування просторового розподілу снігу і льоду.

У дослідженні (Wu, Zhang, Zhang, Lu & Zhong, 2012) для моніторингу льодовикових змін біля ріки Янцзи (Китай) аналізували зображення на основі матриці суміжності рівня сірого тону. Оцінювали такі параметри як середнє, дисперсія, однорідність, контраст, неподібність, ентропія та кореляція.

Проаналізувавши ці публікації, можна зробити висновок, що PCA мають великий потенціал для моніторингу льодовиків. Проте, на результати досліджень впливає такий чинник як контраст льодовика і прилеглих територій. Тобто, така відмінність не є очевидною, потрібен інший підхід для отримання даних з необхідною точністю.

Метод лазерного сканування повітряного базування. Застосування методу лазерного сканування повітряного базування розглядається у дослідженнях (Züblin, Fischer & Eisenbeiss, 2008, Knoll & Kerschner, 2009, Deems, Painter & Finnegan, 2013). У роботі (Züblin, Fischer & Eisenbeiss, 2008) сканування льодовика виконували з гелікоптера у високогірних районах Альп. Пропонується поєднання даних аерофотознімання і лазерних систем повітряного базування для покращення ЦМР. Для дослідження використовували аерофотознімки (1956-2001р.р.) та матеріали лазерного сканування (2005-2007р.р.). Опрацювання знімків виконували в ПП Leica Photogrammetry Suite, а лідарних даних за допомогою програмного забезпечення SCOP++. Розрізнення ЦМР складало 2 м за результатами аерофотознімання та 1 м для даних лазерного сканування.

У публікації (Knoll & Kerschner, 2009) описано підхід моніторингу льодовика в Південному Тіролі (Італія) лазерними системами повітряного

базування упродовж 2005-2006 років. За отриманими даними будували ЦМР. Розрізнення цифрової моделі складало 2,5 м. Використовуючи результати попередніх досліджень (з 1997 р.), визначали зміни площ, об'ємів та зміщення льодовика.

Проаналізувавши ці роботи, варто наголосити, що використання лазерних систем повітряного базування для моніторингу льодовиків є перспективним методом (Knoll & Kerschner, 2009). На даний час при скануванні виникає ряд похибок, які ще не вдалось усунути (Yan, Shaker & El-Ashmawy, 2015). Це пов'язане з тим, що лазерні промені відбиваються від льодовикової поверхні, особливо в гірських районах та виникають «мертві» зони на зображеннях. Втрата даних про поверхню льодовика переважно зустрічається в місцях, які покриті снігом або глибокими тріщинами.

Сьогодні для спостережень за станом льодовиків використовуються сучасні засоби дистанційних наземних досліджень, які дають можливість, значно підвищити швидкість виконання вимірювань і точність отримання кількісних параметрів об'єктів дослідження, зокрема поверхонь острівних льодовиків. Такими методами є наземне лазерне сканування та наземне цифрове знімання (Глотов & Марусаж, 2013).

Метод наземного цифрового знімання. Використання НЦЗ для моніторингу скельних льодовиків розглядається в публікаціях (Kaufmann & Ladstädter, 2008 а, б., Kaufmann, 2012). Пропонується використати цифрові неметричні знімальні камери та потужне програмне забезпечення. Таке поєднання розглядається на практичному прикладі досліджень (Kaufmann, 2012) на скельному льодовику в Австрії в 1986, 1999, 2003 і 2008 роках за допомогою аналогових (Zeiss Photho 19/1318, Linhof Metrika 45, Rolleiflex 6006) та цифрових камер (Hasselblad H3D-39, Nikon D100 і Nikon D300). Опрацювання зображень виконували з використанням сучасних методів комп'ютерної візуалізації. Для всієї області з високою точністю визначено тривимірні вектори руху, щоб виявити просторово-часові зміни швидкості потоку льоду.

У роботі (Kaufmann, 2012) пропонується такий алгоритм робочого процесу: дані для дослідження складаються щонайменше з трьох або навіть більше знімків, отриманих з попередньо відкаліброваних камер. Фокусні віддалі об'єктива обирали так, щоб максимально отримати великомасштабні зображення із захопленням загальної кількості контрольних точок. Аналогові знімки оцифровано за допомогою програмного пакета UltraScan 5000. Побудову мережі просторової фототріангуляції виконували з використанням координат опорних точок, отриманих за допомогою GPS приймача. Середньоквадратичні похибки (СКП) знаходились в діапазоні від ± 10 см до ± 20 см. Варто підкреслити, що на величини СКП впливають випадкові похибки орієнтування знімків та візуального сприйняття поверхні, оскільки, подекуди льодовик покритий брудом та камінням, що ускладнює роботу оператора.

Вплив подібних ефектів можна зменшити шляхом порівняння фотограмметричних профілів, отриманих з різних камер того ж періоду. Обов'язковою умовою при порівнянні даних є використання стабільних, встановлених на нерухому поверхню, пунктів (Kaufmann & Ladstädter, 2008 a, b).

Зміну товщини льоду розраховували шляхом побудови ЦМР різних льодовикових стадій. Автори припускають, що середня щорічна зміна висоти поверхні (опускання) сягає близько 2 м, відносну похибку вимірювання в такому випадку можна очікувати ± 10 %.

Перевагами таких методик є легкість збору даних при порівняно обмеженій кількості персоналу, необхідного для виконання польових робіт. Проте, процес фотограмметричного опрацювання даних вимагає досвідчених операторів.

Доцільність використання цифрової фотограмметрії підтверджується у роботі (Winkler, Pfeffer & Hanke, 2012). при моніторингу льодового шпилю Кіліманджаро. НЦЗ виконували камерою Nikon D2X DSLR, а тахеометричну зйомку – тахеометром Leica TCRA 1101 для забезпечення прив'язки до місцевої системи координат. За побудованою ЦМР у ПП PhotoModeler обчислювали зміщення льодового покриву шпилю для різних періодів часу (з інтервалом 223, 142 і 223 дні), що пов'язано з дією сонячного випромінювання на поверхню Землі.

Належить зазначити, що запропонований метод може бути успішно застосований для проєктів довготермінового моніторингу, але тільки малих льодовиків або окремих частин льодовика.

Використання знімальних камер для визначення швидкості зміни льодовикової маси розглядається у статтях (Whitehead, Moorman, Wainstein & Habib, 2010, Fallourd et al., 2010). В обох працях дослідження виконували за допомогою двох цифрових камер, призначених для отримання зображень поверхні льодовика у двох різних напрямках для певного періоду часу. У роботі (Whitehead, Moorman, Wainstein & Habib, 2010) було отримано серії зображень з двох камер Canon XTi Digital Rebel з інтервалом часу два місяці. Першу камеру встановлювали для отримання інформації про покриття ділянки безпосередньо під льодовиком. Другу камеру розташовували поруч для знімання по всій довжині льодовика. Точність отриманих результатів складала 0,57 м (східний напрямок) та 3,5 м (західний напрямок).

Для інтерпретації отриманих даних серії зображень з обох камер об'єднали у вигляді фільму. Це дало можливість аналізувати зміну ступеня танення льодовикових мас.

Потрібно зазначити, що в результаті реалізації технологічної схеми виникли труднощі, пов'язані зі зміною кутів орієнтування камери. Отримана точність не відповідає зазначеним вимогам. Для зменшення впливу таких чинників варто використовувати постійні опорні точки, відкалібровані камери та точні ЦМР.

Метою дослідження (Fallourd et al., 2010) було періодичне отримання цифрових зображень без зміни положення установок камер зі збереженням поля зору з плином часу для моніторингу льодовика Арджентіро (Франція). Більшість розробок базувались на застосуванні програмного забезпечення для мікроконтролера – Texas Instruments MSP430F149. Для опрацювання даних використовували кореляцію пар зображень, отриманих з різних камер. Швидкість зміни льодовикової маси обчислювали в см/день за двома конкретними точками на парах знімків.

Дане дослідження є доволі перспективним, проте, вектори зсуву були виражені тільки в двовимірному просторі. Крім того, глобальну зміну швидкостей визначали як піксель/день, так як віддаль між камерою і місцевістю була невідомою.

Чутливість льодовиків до коливань клімату та вивчення впливу кріоконіту на процес танення льодовиків описано у публікації (Sanz-Abianedo, Chandler & Irvine-Fynn, 2012). Для дослідження використовували ЦМР, побудовану на субсантиметровому та мікро рівнях. Такі детальні поверхні дозволили розглянути зв'язок між властивостями кріоконіту та поверхнею льоду, а також дослідити їх в просторі та часі. Польові виміри виконували в Шпіцбергені протягом літа 2010 р. Для знімання використовували 5-мегапіксельну камеру Nikon 5400. Цифрову камеру встановлювали на висоті 1,6 м над поверхнею льоду, забезпечуючи відхилений випадок знімання. Знімки отримано з трьох віддалей (камера-об'єкт), що покривали три різні поверхні. Зображення опрацьовували в ПП PhotoModeler Scanner.

Точність отриманих результатів склала 4,5 мм для ділянок площею 4 м² та 6 мм для ділянок площею 9 м², хоча якість ЦМР змінювалась залежно від чистоти льоду, а істотніше від кута нахилу зображень.

Більшої уваги заслуговує робота (Mills, Buckley, Mitchell, Clarke & Edwards, 2005). У статті розглядається питання моніторингу прибережних змін за допомогою інтеграції методів геоматики для відтворення берегової лінії з високим просторовим розрізненням. Наголошується на врахуванні характеристик місцевості. Це є оптимальним підходом для виявлення змін форм рельєфу, особливо в прибережній зоні, де відбуваються динамічні процеси.

Запропоноване рішення базується на поєднанні даних двох технологічних компонент – GPS приймачів і цифрової малоформатної камери. Проаналізувавши запропоновану методику, потрібно зазначити, що потенціал автоматизації процесів може забезпечити ефективний підхід до моніторингу рельєфу. Варто підкреслити, що переваги такої методики очевидні, оскільки є можливість введення великої кількості даних про місцевість в модульному режимі. Однак

виникає необхідність оцінити результати, отримані системою. Тобто, чи відповідають вони дійсності та чи похибки даних і їх реєстрації не показують хибних змін.

Визначення швидкості зміщення льодовиків за допомогою наземних цифрових та аерокосмічних знімків і даних наземного лазерного сканування подано у статті (Maas, Schwalbe, Dietrich, Bäessler & Ewert, 2008). У праці аналізують спостереження на трьох льодовиках у західній Гренландії. Для досліджень використовували цифрові камери з високою розрізнявальною здатністю, які працювали періодами по 24-72 години з інтервалом знімання – 10-15 хвилин. Варто зазначити, що при виконанні спостережень виникали труднощі пов'язані зі зміною кутів орієнтування камери, спричинені впливом вітру, нагріванням ніжок штатива та нестійкістю земної поверхні. Опрацювання отриманих зображень, дозволила побудувати ЦМР льодовика з високим розрізненням.

Також зміщення льодовиків визначали за знімками інтерферометричних РСА (2004р.). Акцентується, що за допомогою супутникових зображень була можливість визначити лише довгострокові зміни швидкості, оскільки розрізнявальна здатність зображень, враховуючи стрімкий рух і зміну поверхні льодовиків, обмежила потенціал функції відстеження.

Метод наземного лазерного сканування. Як альтернативу та доповнення попередніх досліджень (Maas, Schwalbe, Dietrich, Bäessler & Ewert, 2008) використано наземний лазерний сканер Riegl LPM-321 (2007р.). Перевагами методу НЛС є незалежність від сонячного світла і текстурі поверхні, тобто є можливість використовувати прилад в довільні моменти часу. Недоліки сканування полягали у обмеженому розрізненні сканів, що викликане розбіжністю променя і низькою швидкістю сканування. Також значні незручності спричиняла необхідність електроенергії для заряду батареї приладу.

Нову методику для визначення швидкості танення льодовиків у Гренландії з використанням лазерних сканерів запропоновано у статті (Schwalbe, Maas, Dietrich & Ewert, 2008). Різномасштабні 3D хмари точок отримано за допомогою

лазерного сканера Riegl LPM-321, який дозволяє виконувати виміри на віддалі до 4 км. За цими даними будували ЦМР та визначали вектори швидкості, шляхом накладання хмари точок і регулярної сітки. Автори також пропонують рішення для визначення та усунення похибок у вимірах кутів.

Проте, варто звернути увагу, що розбіжність променя (0,8 мрад), спричинила обмеження просторового розрізнення, а швидкість сканування (10 точок/с) значно збільшила тривалість спостережень.

У роботі (Rodriguez, 2012) розглядається методика та результати застосування НЛС для отримання даних про поверхню льодовика Бельведері, в Альпах. Традиційні вимірювання, які проводили з використанням GPS і гляціологічних рейок, забезпечували тільки точкову оцінку явищ. Тому заплановано кілька кампаній НЛС на різних ділянках поверхні льодовиків, щоб оцінити геодинамічні явища у процесі їх еволюції.

Для дослідження використовували лазерний сканер Optech ILRIS-3D™. Виконано дві сесії сканування для кожного району спостережень з метою визначення змін об'ємів льодовика. Під час третьої сесії, на центральній частині льодовика, порівнювали результати з вимірюваннями гляціологічними рейками та доповненими даними з GPS приймачів.

Варто зазначити, що у роботі фактично застосовували дві методики НЛС. Тобто, для спостережень деяких ділянок використовували зв'язкові марки, а для інших опорними точками були характерні природні об'єкти, наприклад валуни.

Похибки на етапі реєстрації даних складали 1-2 см за використання зв'язуючих марок та близько 20 см, де контрольними точками були природні об'єкти. В результаті опрацювання отримали ЦМР кожного з районів спостережень. Порівняння поверхонь показало, що середній показник зсуву складає понад 2 м з середньою швидкістю 0,05 м/добу. Крім того, за допомогою традиційних вимірювань визначали величину загального вертикального зсуву.

Аналізуючи дану працю, можна зробити висновок, що запропоновані методики дозволяють виконувати швидкі та точні спостереження. Особливої уваги заслуговує методика використання природних об'єктів як опорних точок,

оскільки це дає можливість виконувати НЛС у місцевості недоступній для розташування марок. Проте, варто зазначити, що такий підхід можливо застосовувати тільки для поверхонь зі стабільними характерними природними об'єктами, які не змінюють розташування протягом періоду спостережень.

У працях (Третяк, Глотов & Голубінка, 2013 а, Третяк, Глотов & Голубінка, 2013 б, Третяк, Глотов, Голубінка & Марусаж, 2013) запропоновано технологію стереофотограмметричного методу та наземного лазерного сканування для моніторингу островних льодовиків антарктичного узбережжя. Було виконано дослідження поверхні виходів льодовиків, розташованих на островах Галіндез та Вінтер. Для польових вимірів використовували наземний лазерний сканер Faro Focus 3D. Для опрацювання результатів вимірів застосовували ПП Faro Scene, в результаті створено просторові моделі виходів льодовиків. Необхідно підкреслити, що сканування виконували за складних погодних умовах. Паралельно скануванню виконували НЦЗ з постійних точок базису.

Автори зазначають, що запропоновані технологічні схеми визначення поверхневих об'ємів льодовиків дають змогу оперативно із необхідною точністю розв'язати поставлену задачу, без додаткових геодезичних вимірів. Проте, варто зазначити що при лазерному скануванні в деяких місцях на поверхні льодовика (тріщини, гроти) з'являлись невідскановані ділянки. Також, порівняльного аналізу точності обох методів в роботах не подано.

Проаналізувавши літературні джерела запропоновано загальну класифікацію методів дослідження льодовиків (рис. 1.7).



Рис. 1.7 Загальна класифікація методів дослідження льодовиків

1.5 Задачі дисертаційної роботи

З аналізу літературних джерел та методів дослідження льодовиків, що стосуються методик визначення їх кількісних параметрів, можна зробити висновок про пріоритетність застосування наземного лазерного сканування та наземного цифрового знімання. Встановлено, що більшість праць зосереджена на вивченні великих за площею льодовиків ($>1 \text{ км}^2$) за матеріалами ДЗЗ (Марусаж, 2014). Дослідження малих льодовиків ($>1 \text{ км}^2$) або їх частин раніше виконували геодезичними методами або ж наземним цифровим зніманням. Метод наземного лазерного сканування набув широкого застосування для дослідження льодовиків, однак, отримані матеріали часто містять «мертві» зони. Комбінування кількох методів виконують експериментальним шляхом без подання відповідних методик. Тому, запропоновано методику комплексного дослідження льодовиків, зокрема змін поверхневих об'ємів, яка базується на застосуванні матеріалів НЛС та НЦЗ.

Вплив льодовиків на географічну оболонку Землі виявляється у зміні клімату планети, піднятті рівня Світового океану й затопленні прибережних територій, позначається на сферах економіки та життєдіяльності суспільства. Це свідчить про актуальність дослідження льодовиків та подальшого використання отриманих результатів державними та приватними установами, підприємствами та організаціями в галузі гляціології, геодинаміки та метеорології.

Тому в дисертаційній роботі поставлено 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.

1.6 Висновки до розділу 1

Проаналізувавши літературні джерела, в яких розглянуто технологічні процеси досліджень динаміки змін льодовиків, потрібно зазначити, що обрана тематика є актуальною, оскільки зміни льодовиків є показниками зміни клімату для всієї планети. На даний час існує багато методів моніторингу льодовиків, які широко висвітлені в сучасних публікаціях.

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.

Аерознімання відповідає техніко-технологічним вимогам, проте, застосування в полярних регіонах має технологічні труднощі, а також характеризується 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 наземного лазерного сканування та наземного цифрового знімання. Це дозволить уникнути «мертвих» зон НЛС та підвищити точність визначення змін об'ємів льодовиків.

РОЗДІЛ 2

РОЗРОБКА СПОСОБІВ ВИЗНАЧЕННЯ ФОКУСНОЇ ВІДДАЛІ ЦИФРОВОЇ НЕМЕТРИЧНОЇ ЗНІМАЛЬНОЇ КАМЕРИ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНЕРА

Дослідження змін острівних льодовиків запропоновано виконувати методами наземного лазерного сканування та наземного цифрового знімання. Для отримання якісних результатів спостережень необхідно проаналізувати та дослідити засоби, що будуть застосовані для розробки методики та процесу підготовчих робіт.

Застосування методу наземного цифрового знімання вимагає попереднього визначення елементів внутрішнього орієнтування цифрових неметричних знімальних камер (ЦНЗК). Одним з важливих елементів, який необхідно мати при опрацюванні цифрових зображень безумовно є фокусна віддаль, значення якої відіграють пріоритетну роль в процесі обчислень координат точок місцевості (Дубиновский, 1982, Глотов & Пащетник, 2010). Окрім цього аналогічно постає проблема визначення і врахування дисторсійних спотворень, які присутні в оптичних системах неметричних цифрових камер, що також впливає на точність обчислення координат точок об'єктів. Тому, вище наведені елементи необхідно визначати і враховувати в подальшому опрацюванні отриманих матеріалів.

Аналогічно, в методиці, що підлягає розробці, застосовується наземне лазерне сканування. Засобом сканування є наземний лазерний сканер, а відтак виникає необхідність дослідити точність визначення координат точок об'єктів з його застосуванням. Це дасть змогу в подальшому визначити оптимальні параметри сканування.

Таким чином, постала задача розробити способи визначення фокусних віддалей цифрових знімальних камер, які б за точністю не перевищували кількісний рівень вимірюваних координат на знімках, а деталі та вузли пристроїв були уніфіковані, технології способів – простими і не вимагати у виконавця спеціальних навичок.

Для методу наземного лазерного сканування необхідно розглянуто чинники впливу та джерела похибок. Для вибору оптимальних параметрів сканування варто проаналізувати залежність інтенсивності повернутого сигналу від віддалі та типу поверхні сканування.

2.1 Способи визначення фокусної віддалі цифрової неметричної знімальної камери

Застосування цифрових неметричних знімальних камер для розв'язання задач цифрової фотограмметрії пояснюється такими чинниками: собівартість камер є меншою порівняно з метричними аналогами; розрізнявальна здатність цих знімальних камер швидко збільшується; отже, враховуючи це збільшення, можна компенсувати розміри кадру, віртуально збільшуючи його без втрати розрізнявальної здатності. Компактність, оперативність, мобільність та доступність є основними перевагами цифрових неметричних знімальних камер. Однак, технічна документація неметричних камер фактично не містить інформації про елементи внутрішнього орієнтування та величину дисторсії, значення яких необхідне для подальшого опрацювання цифрового зображення. Застосування неметричних цифрових знімальних камер неможливе без їх періодичного калібрування, тому, необхідно розробляти способи визначення цих елементів з потрібною точністю.

Для визначення змін поверхневих об'ємів острівних льодовиків антарктичного узбережжя за результатами наземного цифрового знімання упродовж 2002-2005, 2013, 2014, 2018, 2019 років застосовували різні цифрові неметричні камери: Kodak DC 260, Olympus E 20p, Canon EOS 450D, Canon 6D, Canon EOS 5D Mark III, Sony Nex7R. Перелічені камери також відрізнялися 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 і камер які будуть застосовуватися в подальших дослідженнях.

На сучасному етапі розвитку фотограмметрії існує велика кількість методів та способів визначення елементів внутрішнього орієнтування цифрових знімальних камер, однак вони не завжди відповідають вимогам точності та інформативності. Деякі з них потребують значних часових затрат та унікального калібрувального обладнання. За таких обставин необхідно розробляти дешевші та мобільні способи калібрування неметричних знімальних камер та систем.

Розглянемо детальніше існуючі методи та способи визначення елементів внутрішнього орієнтування та калібрування ЦНЗК.

В фотограмметрії знаним є спосіб калібрування фотокамер за допомогою дзеркального тест-об'єкту (Амромин, 1991). Для досліджень використовують два дзеркала, що закріплені в спеціальній рамі для жорсткості конструкції. На одне дзеркало нанесені точки (марки) з відомим взаємним розташуванням, а у отворі іншого розташована цифрова знімальна камера. Суть способу полягає в тому, що нерухомою камерою знімають тест-об'єкт, який переміщують, таким чином, щоб всі опорні точки відображались на знімку. Зображення опорних точок на знімку розглядають як знімки окремих (квазіконвергентних) знімків, отриманих з різних центрів проєкцій.

Параметри калібрування камери визначають, базуючись на умові колінеарності. Автор зазначає, що підвищення точності величин, які визначаються, досягають збільшенням кількості квазіконвергентних знімків. В цій статті підкреслено ряд переваг за використання дзеркал для калібрування камер: зменшення кількості геодезичних робіт, забезпечення кращої стабільності точок, а також можливість застосування дзеркального тест-об'єкту без використання опорних точок.

Проте, реалізація способу є досить трудомісткою (високі вимоги до установки дзеркал, отвір для камери всередині одного дзеркала), що вимагає прецизії встановлення.

У праці (Гельман, 1982) запропоновано спосіб калібрування камер, що базується на зніманні тест-об'єкта двома камерами з однієї точки простору. При цьому елементи внутрішнього орієнтування однієї камери повинні бути відомими,

а параметри дисторсії – нехтувано малі. Знімки, отримані камерою з відомими елементами внутрішнього орієнтування, вважалися еталонними, а визначення елементів внутрішнього орієнтування і параметрів дисторсії іншої камери визначали з порівняння отриманого зображення (реального) з еталонним (ідеальним) знімком, отриманим першою камерою.

Недоліком способу є складність калібрування, що зумовлено необхідністю мати еталонну камеру з відомими елементами внутрішнього орієнтування і з нехтувано малими параметрами дисторсії.

Полеві способи калібрування цифрових камер застосовано в дослідженнях (Патент № 2308001, 2007, Быков, 2012, Быков, А. Л., Быков, В. Л., & Быков, 2016). Запропоновано два способи калібрування камер для контролю результатів. Перший спосіб передбачає використання рівнинного полігону для повного калібрування камери з визначенням ЕВНО та елементів зовнішнього орієнтування (ЕЗО), а також параметрів дисторсії об'єктива та впливу похибок атмосфери. Другий спосіб дозволяє виконати часткове калібрування камери, де із ЕВНО можна визначити тільки фокусну віддаль. Такий спосіб називають двоярусним способом калібрування, тобто він базується на одночасному використанні умов колінеарності та рівності різниць висот знімання різномасштабних знімків.

Варто зазначити, що перший варіант має беззаперечні переваги, не потребує двоярусного знімання місцевості, не має обмежень в кількості та масштабах знімків. Проте, параметри калібрування повністю залежать від координат центрів знімання, точність яких визначається похибками визначення координат супутникової антени та похибками фіксації елементів редукації антени відносно центру знімання. В той же час, результати дослідження другого способу показали, що спосіб дозволяє отримати параметри, що визначаються з необхідною точністю. Автори рекомендують виконувати опрацювання вимірів послідовно способами повного та часткового калібрування.

Слід підкреслити, що в ході експерименту (Быков, 2012) потрібно задавати початкові значення ЕВНО знімків (не рівні нулю). Також експериментально-

дослідницькі роботи виконували тільки для макетних знімків, а створення полігону для калібрування камер вимагає значних ресурсів.

Метою роботи (Pérez, Agüera & Carvajal, 2011) є створення ефективного і точного методу цифрового калібрування камери, який буде використовуватися безпосередньо в умовах знімання, наприклад для БПЛА. Параметри калібрування визначали двома методами: в лабораторних та польових умовах. Процес калібрування в лабораторних умовах повністю автоматизовано з використанням калібрувальної сітки. Польовий метод досліджено для висоти знімання 50 м з параметрами знімання аналогічними до лабораторних тестувань.

Автори зазначають, що польовий метод калібрування дозволяє зменшити значення похибок, отриманих при попередньому калібруванні в лабораторії. Крім того, загальні СКП, отримані двома методами схожі. Однак, в публікації не приведено інформації щодо впливу зміни висоти знімання на значення параметрів калібрування.

У статті (Hamid, Ahmad, Ma'arof & Hashim, 2013) подано способи калібрування цифрової камери Canon Power Shot SX230 HS за нормального та конвергентного випадків знімання. Дослідження камери виконували в лабораторних та польових умовах. Лабораторне калібрування проводили на 3D-тестовому полігоні розміром 0,4 м × 0,4 м з мережею марок, розташованих на різних висотах. Для калібрування на місцевості використовували така ж концепція 3D-тестового полігону, яка складалась з 81 марки, розташованої на рівнинній поверхні, розмірністю 9 м × 9 м. Аерознімки полігону отримано за допомогою БПЛА. Метою калібрування було визначення планових елементів внутрішнього орієнтування, фокусної віддалі та дисторсії. Всі зображення опрацьовували з використанням програмного забезпечення для фотограмметричного калібрування. Точність результатів оцінювали за стандартним відхиленням.

Загалом точність результатів визначення елементів внутрішнього орієнтування (ЕВНО) та дисторсіїї приблизно однакова, тому вибір кращого

способу калібрування автори рекомендують здійснювати залежно від прикладних задач.

Використання програмного забезпечення для калібрування камер подано в роботах (Wiggenhagen, 2002, Ebrahim, 2005, Zhang, Jiang & Han, 2010, Михайлов, Чибунічев & Курков, 2012). У роботі (Михайлов et al., 2012) для вирішення завдання калібрування камер розроблено і використовується спеціалізоване програмне забезпечення. Параметри калібрування визначали в результаті багаторазового спільного розв'язку оберненої фотограмметричної задачі способом найменших квадратів за знімками просторового тест-об'єкта з надлишковими вимірами, щоб забезпечити високу точність визначень. Параметри, які визначаються в процесі калібрування: фокусна віддаль, координати головної точки, параметри моделі дисторсії. Результати досліджень демонструють надійність застосованих методів. В результаті опрацювання знімків похибка фотограмметричних вимірів не перевищувала допустимої (близько 1 мм).

У публікації (Wiggenhagen, 2002) подано результати модифікованого методу калібрування для обчислення елементів внутрішнього орієнтування цифрових неметричних камер. Для калібрування використовували програмне забезпечення Camera Calibrator 4.0 і PhotoModeller 4.0. Результати калібрування цифрових камер Olympus E-10 і Nikon Coolpix 990 перевірено повторними вимірами і додатково порівняно за допомогою іншого програмного забезпечення.

Варто зазначити, що зображення отримано в аналогічних умовах до знімання з БПЛА. Проте, необхідність відповідної поверхні для нанесення марок і точність вимірювання є недоліками методу. Також, виникали труднощі, пов'язані з недостатньою кількістю знімків, отриманих з різних ракурсів.

У роботі (Zhang et al., 2010) запропоновано аналогічний польовий метод калібрування неметричної цифрової камери. Дослідженні виконували на відкритій місцевості, без спеціальних марок. Простота калібрування з плоскою сіткою є очевидною перевагою цього методу. Необхідним обладнанням є лише калібрувальний зразок, цифрова камера і штатив для забезпечення стабільності. Проте, такий спосіб не дозволяє отримати необхідну точність калібрування камер.

Проаналізувавши праці, в яких для калібрування камер використовується програмне забезпечення, варто виділити пакет Photomodeler. Керування Photomodeler для застосування автоматичного калібрування є дуже простим, а його вартість у порівнянні з іншими програмними засобами для калібрування цифрових камер відносно низька. Однак, варто підкреслити, що калібрування передбачає опрацювання і перетворення зображень програмними засобами, а це може призвести до деяких спотворень на зображеннях (Ebrahim, 2005).

У публікації (Михеева, 2011) розглядають параметри калібрування об'єктивів цифрових неметричних знімальних камер і вимоги, яких необхідно дотримуватися для отримання якісних матеріалів. Автор зазначає, що в паспортах цифрових камер приводять не діапазон фокусних віддалей, а діапазон відрізків, в межах яких може переміщатися ПЗЗ-матриця для отримання різкого зображення. В роботі також наведено формули для визначення довжини таких відрізків та фокусної віддалі.

У працях (Глотов & Пащетник, 2010, 2013, Патент на винахід № 94376, 2011, Патент на винахід №99984, 2012, Патент на винахід № 107756, 2015, Plotov, Nunina & Yurkiv, 2017) запропоновано способи визначення фокусної віддалі цифрової знімальної камери за допомогою контрольно-вимірної сітки (КВС). В (Патент на винахід №99984, 2012) як додатковий засіб використовують кутомірний пристрій. Такі способи дозволяють підвищити технологічність, оперативність та точність, а також зменшити собівартість визначення фокусної віддалі. Проте, залежно від віддалі до об'єкта знімання, значення еквівалентної фокусної віддалі змінюється та істотно відрізняється від встановленого.

За результатами аналізу літературних джерел підтверджено необхідність розробки способів визначення ЕВНО камери та її калібрування.

Як видно аналізу літературних джерел існуючі способи не завжди відповідають висунутим вимогам. Деякі з них потребують значних часових затрат та унікального калібрувального обладнання. За таких обставин необхідно розробляти дешевші та мобільні способи калібрування неметричних знімальних камер та систем, які можна реалізувати за допомогою простого та недорогого

обладнання, існуючих і широко поширених в топографо-геодезичному (фотограмметричному) виробництві уніфікованих пристроїв і приладів.

Наприклад, реалізація способу визначення фокусної віддалі цифрової неметричної камери (Патент на винахід №99984, 2012) є трудомісткою, (Амромин, 1991) – потребує спеціального номенклатурного обладнання, що знижує в першу чергу собівартість, оперативність та технологічність способу, також точність визначення фокусних віддалей є не достатньою (при допустимих 0,005-0,01 мм).

Як зазначено вище, завдання полягає також в тому, щоб розробити декілька способів, з метою їх застосовування для різних камер та віддалей знімання. Проте, в першу чергу треба вирішити питання обчислення попередньої точності визначення шуканої величини.

Вплив похибки визначення фокусної віддалі. Відомо, що координати точки знімка та фокусна віддаль поєднані наступними залежностями (Лобанов, 1983). Нехай фокусна віддаль змінилась на величину Δf . В такому випадку координати x та z точки знімка зміняться на величини:

$$\Delta x = \frac{x}{f} * \Delta f, \quad \Delta z = \frac{z}{f} * \Delta f, \quad \text{Те}$$

З формул (2.1) визначимо максимально допустиму зміну фокусної віддалі, щоб її точність не перевищувала похибки виміру координат точок на знімках. Наприклад, для камери Canon 450D (розмір кадру 22,2x14,8 мм, $f=18$ мм, розмір пікселя 5,2 мкм) максимально допустима зміна значення фокусної віддалі становить $\Delta f=8,2$ мкм. Тобто, для забезпечення виміру координат точок на знімках на цифровій фотограмметричній станції з точністю до пікселя, необхідно знати значення фокусної віддалі з точністю до 8,2 мкм.

Запропоновано три способи визначення фокусної віддалі, які дозволять з необхідною точністю отримувати координати точок досліджуваних об'єктів.

Перший спосіб визначення фокусної віддалі ЦНЗК

Спосіб може бути використаний при визначенні фокусної віддалі неметричних цифрових знімальних систем та подальшого застосування

стереофотограмметричного методу у різних галузях науки і техніки: в архітектурних обмірах, для дослідження деформацій інженерних споруд, у військовій справі, медицині тощо. А також у прикладній оптиці, для визначення конфігурації поверхонь та радіусів лінз оптичних систем.

Технологічна реалізація способу визначення фокусної віддалі ЦЗК полягає в наступному (Глотов & Марусаж, 2016 а, б, Патент на корисну модель № 110910, 2016). Встановлюють цифрову знімальну камеру 1 на підставку 4 в штативі 5 і приводять у робочий стан – нівелюють її за допомогою накладного або рамного рівня. При чому, навколо початкового торця тубусу об'єктиву камери встановлюється фрагмент контрольної-вимірної сітки 6, який потрібен для проведення процесу зовнішнього орієнтування отриманих зображень. У безпосередній близькості від камери встановлюють на підставку дзеркало 2 на штативі 5 так, щоб головний оптичний промінь був перпендикулярний до дзеркала. На рис. 2.1 наведено схематичне розташування приладів та елементів знімання, а на рис. 2.2 подано фрагмент КВС 6, де 1 – отвір для об'єктива камери.

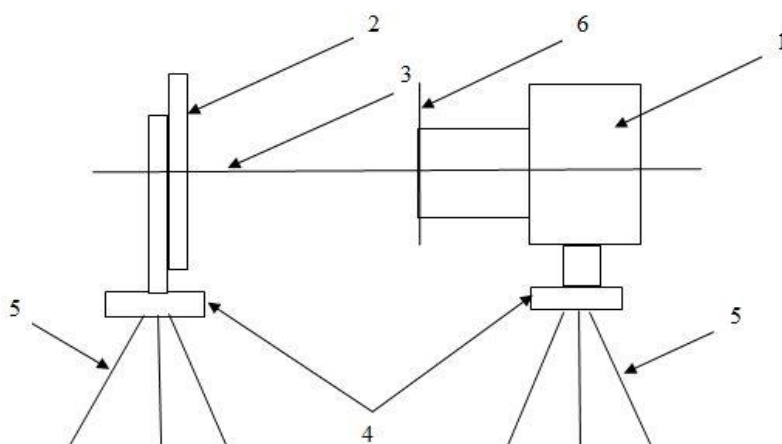


Рис. 2.1 Схематичне розташування приладів та елементів знімання

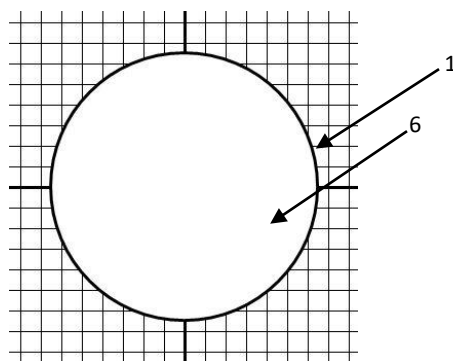


Рис. 2.2 Фрагмент контрольної-вимірної сітки

Після приведення комплексу в робочий стан, ЦЗК відхиляють на відповідний кут вправо (таким чином, щоб головна оптична вісь не була перпендикулярна до дзеркала) для виконання знімання відображення ЦЗК у дзеркалі. Далі камеру повертають вліво та роблять аналогічне знімання (рис. 2.3).



Рис. 2.3 Визначення фокусної віддалі

На рис. 2.4 схематично зображено спосіб визначення фокусної віддалі ЦЗЗК, де: 6 – об’єктив в двох положеннях; 7 – умовний базис знімання; 8 – проєктуючі промені; 9 – A' , A'' побудоване зображення лінзи об’єктива; 10 – відбиті промені.

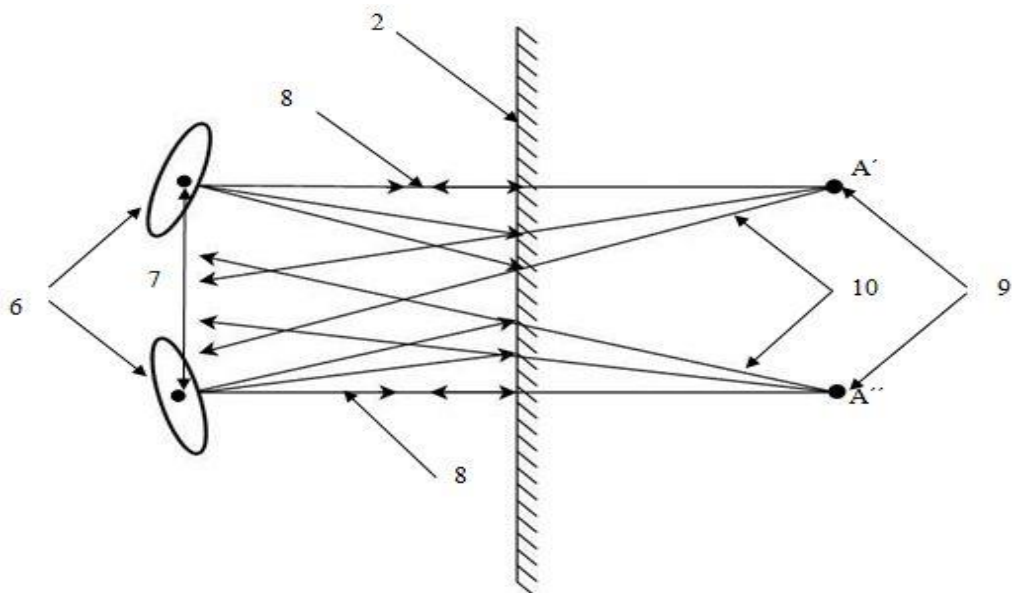


Рис. 2.4 Принципова схема способу

Наступним етапом роботи є процес зовнішнього орієнтування знімків. В якості опорних точок вибирають перехрестя сітки (рис. 2.2) та визначають їх

координати в умовній системі координат. Для прикладу каталог координат опорних точок (перехресть сітки) наведено в таблиці 2.1.

Передають одержані цифрові зображення у вікно «Зовнішнє орієнтування» цифрової фотограмметричної станції, наприклад «Дельта-2», попередньо задавши параметри камери та каталог опорних точок, і виконують орієнтування знімків.

Таблиця 2.1

Каталог координат опорних точок

№з/п	X, мм	Y, мм	Z, мм
1	100.00	100.00	100.00
2	100.00	800.00	100.00
3	800.00	800.00	100.00
4	800.00	100.00	100.00
5	800.00	450.00	100.00
6	100.00	450.00	100.00
7	450.00	100.00	100.00
8	450.00	800.00	100.00
9	200.00	200.00	100.00
10	700.00	700.00	100.00
11	700.00	200.00	100.00
12	200.00	700.00	100.00

Подальше опрацювання виконують у програмному пакеті Digital, а саме вимірюють координати (X, Y, Z) точок 1-5 (рис. 2.5), що розташовані на поверхні лінзи об'єктива.

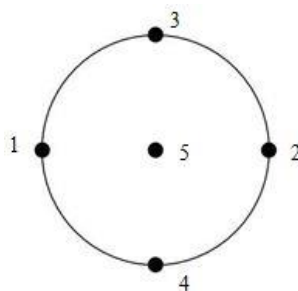


Рис. 2.5 Розташування точок 1-5 на поверхні лінзи об'єктива ЦЗК

На рис. 2.6 подано вертикальний переріз поверхні лінзи об'єктива, де точка S – центр оптичної системи, r – радіус лінзи, l – висота центрального кульового сегмента лінзи, a – половина хорди цього сегмента. Координати точок 1, 2, 3, 4, 5 – це координати точок, що вимірюють на краях (1-2, 3-4) та в центрі (5) поверхні лінзи об'єктива.

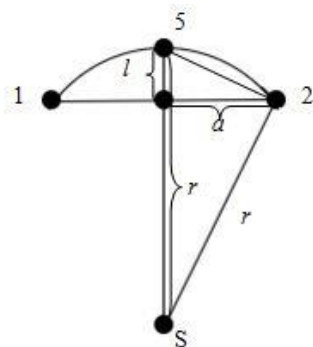


Рис. 2.6 Вертикальний переріз поверхні лінзи об'єктива

За вимірними координатами точок визначають хорди 1-2 та 3-4 та значення a за поданими формулами:

$$a_1 = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}}{2}, \quad (2.2)$$

$$a_2 = \frac{\sqrt{(x_3 - x_4)^2 + (z_3 - z_4)^2}}{2}, \quad (2.3)$$

$$a = \frac{a_1 + a_2}{2}, \quad (2.4)$$

Розраховують висоту центрального кульового сегмента лінзи за наступними формулами:

$$l_i = Z_5 - Z_i, \quad (2.5)$$

$$l_{\text{сеп}} = \frac{l_1 + l_2 + l_3 + l_4}{4}, \quad (2.6)$$

Радіус лінзи об'єктива ЦНЗК визначають за формулою:

$$r = \frac{a^2 + l^2}{2l}, \quad (2.7)$$

За отриманим значення радіуса обчислюють значення фокусної віддалі:

$$f = \frac{r}{2}, \quad (2.8)$$

Для апробації способу визначено фокусну віддаль цифрової знімальної камери Canon EOS 450D № 2280509273 при середньому значенні фокусної віддалі для фіксованої позначки 55 мм. Значення вимірних координат точок 1-5 (X, Y, Z) поверхні лінзи об'єктива подані в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2

Значення координат точок поверхні лінзи об'єктива

№ з/п	X, мм	Y, мм	Z, мм
1	452,798	226,958	90,392
2	451,232	670,751	92,056
3	673,979	450,326	90,035
4	224,193	449,235	99,587
5	453,979	448,271	-54,465

За формулами (2.2)-(2.8) обчислено апріорну оцінку точності $m_f=6$ мкм та фокусну віддаль – $f=51,54$ мм, при $a=223,422$ мм, $l=147,283$ мм. $m_a= m_l=7,5$ мкм.

Запропонований спосіб може бути застосований для визначення фокусних віддалей як короткофокусних так і довгофокусних ЦНЗК. Окрім того за допомогою даного способу можна визначити кривину лінзи об'єктива, а в подальшому для характеру дисторсійних спотворень.

На запропонований спосіб одержано патент на корисну модель «Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової знімальної камери» (Патент на корисну модель № 110910, 2016).

Другий спосіб визначення фокусної віддалі ЦНЗК

Запропонований спосіб може бути використаний при визначенні фокусної віддалі неметричних цифрових знімальних камер, які використовуються для складання фронтальних планів фасадів та інтер'єрів архітектурних пам'яток,

моніторингу деформацій інженерних споруд, зсувних та сельових процесів, відкритих гірничих виробок, льодовиків, при зніманні з БПЛА тощо.

Технологічна реалізація способу визначення фокусної віддалі ЦЗК полягає в наступному (Глотов & Марусаж, 2019 а, б, Патент на корисну модель № 135876, 2019). На підставку штатива закріплюють каретку з мікрометричним гвинтом 1, на яку встановлюють контрольну-вимірну сітку 2 і нівелюють її за допомогою накладного рівня. У безпосередній близькості від неї на підставку другого штатива закріплюють каретку з мікрометричним гвинтом 5, на яку встановлюють цифрову знімальну камеру 4 так, щоб головна оптична вісь 3 була наближено перпендикулярна до КВС. ЦЗК приводять у робочий стан – нівелюють її за допомогою накладного рівня (рис. 2.7).

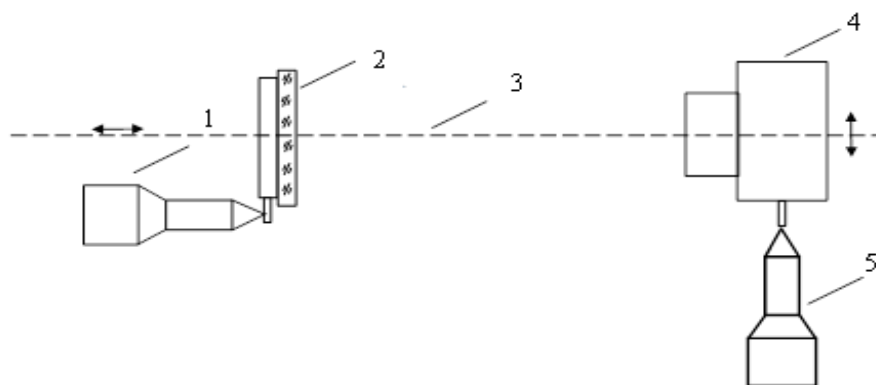


Рис. 2.7 Схематичне розташування приладів та елементів знімання

Після приведення комплексу в робочий стан (рис. 2.8), виконують знімання фрагменту КВС А з лівої точки базису. Переміщують ЦЗК вздовж базису знімання за допомогою мікрометричного гвинта, з забезпеченням перпендикулярності головної оптичної осі до площини КВС та виконують знімання фрагменту КВС А з правої точки базису. Переміщують КВС вздовж оптичної осі ЦЗК на фіксовану віддаля за допомогою мікрометричного гвинта та виконують знімання фрагменту КВС А' з правої точки базису. Переміщують ЦЗК вздовж базису знімання за допомогою мікрометричного гвинта у початкове положення, з забезпеченням перпендикулярності головної оптичної осі до площини КВС та виконують знімання фрагменту КВС А' лівої точки базису (рис. 2.9).



Рис. 2.8 Визначення фокусної віддалі ЦЗК

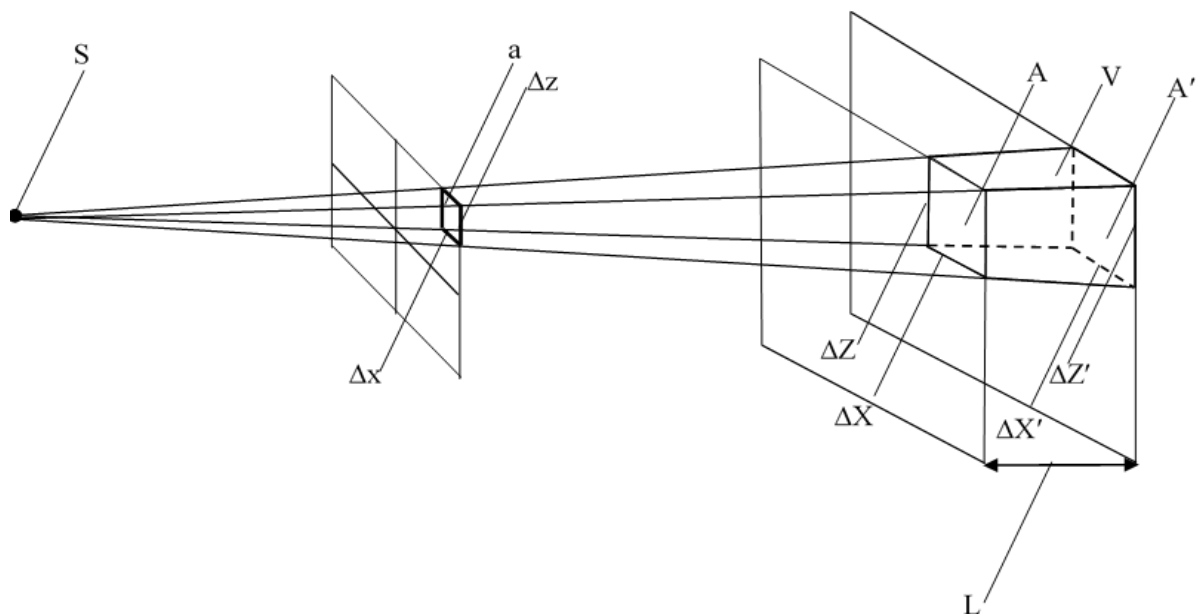


Рис. 2.9 Схема визначення фокусної віддалі ЦЗК

На цифрових зображеннях отримують сітку квадратів із кроком Δx , Δz . Вершинам квадрату a відповідатимуть на місцевості відповідні вершини площини A на місцевості – при початковому положенні КВС та A' – після зміщення КВС на віддаль L . Відповідно площини A та A' утворюють паралелепіпед з об'ємом V , який визначають за формулою:

$$V = \Delta X \times \Delta Z \times L, \quad (2.9)$$

Далі вимірюють координати на відповідних перетинах КВС за отриманими зображеннями.

За основу способу визначення фокусної віддалі взято спосіб вертикальної сітки визначення об'ємів (Катушков, Мархвіда, Пастух, Панкрат'єв & Сердюков, 1994). Тоді значення фокусної віддалі ЦНЗК визначають за формулою:

$$f = \frac{3V}{B^3 \Delta x \Delta z \left(\frac{1}{p'_{cp}{}^3} - \frac{1}{p_{cp}{}^3} \right)}, \quad (2.10)$$

де, V – об'єм паралелепіпеда, основами якого є фрагменти КВС до і після переміщення;

B – базис знімання;

$\Delta x, \Delta z$ – відповідні розміри сторін основи паралелепіпеда, побудованого на знімку

p_{cp}, p'_{cp} – середні значення повздовжніх паралаксів, виміряних на відповідних перетинах контрольно-вимірної сітки у обох положеннях.

Апріорну оцінку точності визначення фокусної віддалі ЦНЗК визначають за формулою:

$$m_f = \sqrt{m_V^2 + m_p^2 + m_{p'}^2 + m_B^2 + m_{\Delta x}^2 + m_{\Delta z}^2}, \quad (2.11)$$

де m_V - похибка визначення об'єму паралелепіпеда:

$$m_V = \sqrt{m_{\Delta x}^2 + m_{\Delta z}^2 + m_L^2}, \quad (2.12)$$

де, $m_{\Delta x}, m_{\Delta z}$ - похибки визначення довжин сторін основи паралелепіпеда:

$$m_{\Delta x} = m_{\Delta z} = \sqrt{2m_x^2} = \sqrt{2m_z^2}, \quad (2.13)$$

де, m_x, m_z - похибки награвіювання перетинів КВС, що дорівнюють 2 мкм;

m_L - похибка визначення переміщення КВС мікрометричним гвинтом – 4 мкм;

$m_{p_{cp}}, m_{p'_{cp}}$ - похибки визначення середніх значень повздовжніх паралаксів;

m_B - похибка визначення довжини базису мікрометричним гвинтом – 4 мкм;

$m_{\Delta x}, m_{\Delta z}$ - похибки визначення довжин сторін основ паралелепіпеда на знімку:

$$m_{\Delta x} = m_{\Delta z} = \sqrt{2m_x^2} = \sqrt{2m_z^2}, \quad (2.14)$$

де $m_x = m_z$ - похибки вимірів координат перетинів КВС на знімку, що рівні 2,5 мкм (пів пікселя).

Для апробації способу визначено фокусну віддаль цифрової знімальної камери Canon EOS 450D № 2280509198 при середньому значенні фокусної віддалі для фіксованої позначки 55 мм. Значення вимірних координати перетинів КВС у ПП Digitala подано у таблиці 2.3. Значення поздовжніх паралаксів p_{cp} , p'_{cp} подані в таблиці 2.4

Таблиця 2.3

Значення вимірних координати перетинів контрольно-вимірної сітки

	Х _л , МКМ	Х _п , МКМ	У _л , МКМ	У _п , МКМ
1	-1154	-6554	-1037	-1052
2	-1147	-6552	1392	1377
3	1286	-4140	1386	1377
4	1274	-4144	-1050	-1049
1'	-1052	-6243	-990	-944
2'	-1047	-6240	1329	1371
3'	1275	-3937	1325	1374
4'	1264	-3941	-995	-944

Таблиця 2.4

Значення поздовжніх паралаксів

	p , МКМ		p' , МКМ
1	5,4	1'	5,20
2	5,41	2'	5,19
3	5,43	3'	5,21
4	5,42	4'	5,21
середнє	5,42	середнє	5,21

За значеннями $B=45$ мм, $\Delta X = \Delta Z = \Delta X' = \Delta Z' = 20$ мм, $\Delta x = 2,433$ мм, $\Delta z = 2,436$ мм, $\Delta x' = 2,322$ мм, $\Delta z' = 2,320$ мм, $h = 20$ мм за формулами (2.9)- (2.14) обчислено апріорну оцінку точності, що становить 8 мкм та значення фокусної віддалі – $f = 55,32$ мм.

Запропонований спосіб є пріоритетним для визначення фокусних віддалей ЦЗК, які будуть застосовуватись для НЦЗ льодовиків та в подальшому визначення змін їх об'ємів. Це пов'язано з тим, що реалізація способу фактично моделює ту ж ситуацію, що і за визначення об'ємів.

На запропонований спосіб одержано патент на корисну модель «Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової знімальної камери» (Патент на корисну модель № 135876, 2019).

Третій спосіб визначення фокусної віддалі ЦЗК

Запропонований спосіб може бути використаний при визначенні фокусної віддалі неметричних цифрових знімальних камер, які використовуються для складання фронтальних планів фасадів та інтер'єрів архітектурних пам'яток, моніторингу деформацій інженерних споруд, зсувних та сельових процесів, відкритих гірничих виробок, льодовиків, при застосуванні БПЛА тощо.

Технологічна реалізація способу визначення фокусної віддалі ЦЗК полягає в наступному (Hlotov, Marusazh & Siejka, 2019 a, b). На підставку штатива закріплюють контрольну-вимірну сітку 1 і нівелюють її за допомогою накладного рівня. У безпосередній близькості від неї на підставку другого штатива закріплюють каретку з мікрометричним гвинтом 4. Далі встановлюють цифрову знімальну камеру 3 так, щоб головна оптична вісь 2 була наближено перпендикулярна до КВС. ЦЗК нівелюють за допомогою накладного рівня (рис. 2.10).

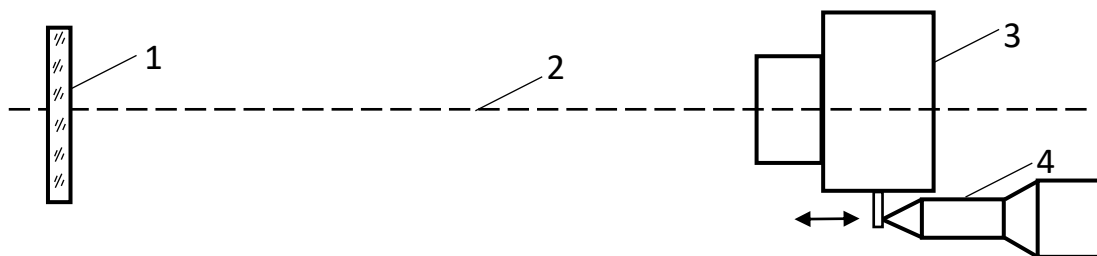


Рис. 2.10 Схематичне розташування приладів та елементів знімання

Після налаштування комплексу виконують знімання КВС з точки S_1 – центр проєкції оптичної системи в першому положенні (рис. 2.11).



Рис. 2.11 Визначення фокусної віддалі ЦЗК

Переміщують ЦЗК вздовж оптичної осі за допомогою мікрометричного гвинта та повторно виконують знімання КВС з точки S_2 – центр проєкції оптичної системи в другому положенні (рис. 2.12).

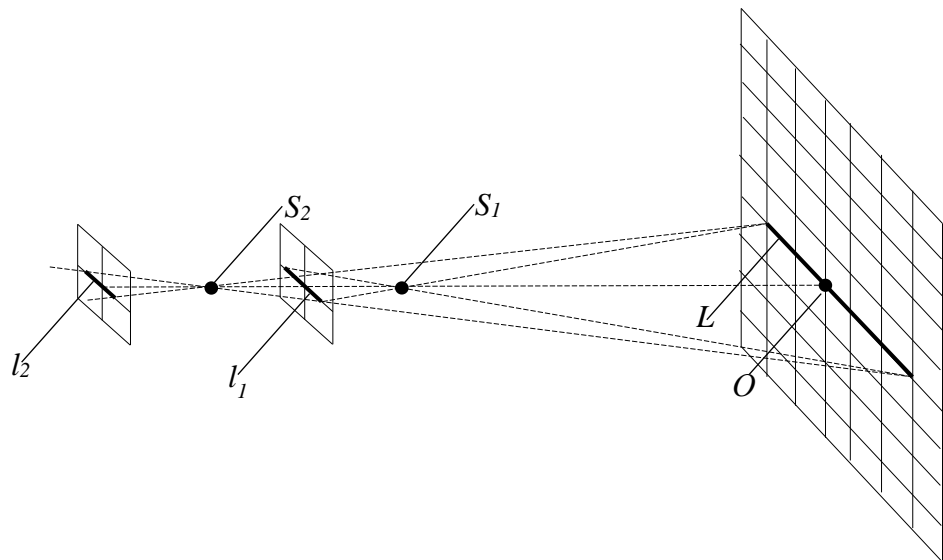


Рис. 2.12 Схема визначення фокусної віддалі ЦЗК

Для подальших досліджень за комірками КВС визначають довжину відрізка L . Відрізок L обирають між крайніми перехрестями КВС, що відобразились на обох знімках. Далі вимірюють координати (x, z) на відповідних перетинах КВС за отриманими зображеннями та обчислюють довжини відрізків l_1 – при початковому положенні ЦЗК та l_2 – після зміщення ЦЗК на віддаль S_1S_2 , що фіксується мікрометричним гвинтом:

$$l_1 = \sqrt{\Delta x_1^2 + \Delta z_1^2}, \quad (2.15)$$

$$l_2 = \sqrt{\Delta x_2^2 + \Delta z_2^2}, \quad (2.16)$$

де,

$\Delta x_1, \Delta z_1$ – різниця координат крайніх перехресть КВС, що відобразились на знімках – кінців відрізка l_1

$\Delta x_2, \Delta z_2$ – різниця координат крайніх перехресть КВС, що відобразились на знімках – кінців відрізка l_2

Для подальших обчислень вважатимемо $S_1 S_2 = d$, віддаль між початковим положенням ЦЗК і КВС рівним $Y = S_1 O$, а різницю довжин відрізків l_1 і l_2 за деяку величину Δl . Тоді, з рис. 2.12 слідує:

$$\frac{\Delta l}{l_1} = \frac{d}{Y}, \quad (2.17)$$

Також, скориставшись масштабним співвідношенням:

$$\frac{f}{Y} = \frac{l_1}{L}, \quad (2.18)$$

З формул (2.17) і (2.18) визначимо віддаль до КВС, відповідно:

$$Y = \frac{l_1 d}{\Delta l}, \quad (2.19)$$

$$Y = \frac{fL}{l_1}, \quad (2.20)$$

Прирівнявши (2.19) і (2.20) та отримаємо:

$$\frac{l_1 d}{\Delta l} = \frac{fL}{l_1}, \quad (2.21)$$

Тоді значення фокусної віддалі ЦЗК:

$$f = \frac{l_1^2 d}{\Delta l L}, \quad (2.22)$$

Апріорну оцінку точності визначення фокусної віддалі ЦЗК визначають за формулою:

$$m_f = \sqrt{\left(\frac{2ld}{\Delta l L}\right)^2 m_l^2 + \left(\frac{l^2}{\Delta l L}\right)^2 m_d^2 + \left(\frac{l^2 d}{\Delta l^2 L}\right)^2 m_{\Delta l}^2 + \left(\frac{l^2}{\Delta l L^2}\right)^2 m_L^2}, \quad (2.23)$$

де, m_l – середньоквадратична похибка СКП виміру довжини сегменту l_l на знімку:

$$m_{l_1} = \sqrt{m_x^2 + m_z^2}, \quad (2.24)$$

де, m_x, m_z – середньоквадратична похибка виміру координат на знімку, що дорівнює 2,5 мкм.

m_d – СКП визначення довжини переміщення ЦЗК мікрометричним гвинтом, що становить 4 мкм;

$m_{\Delta l}$ – СКП виміру різниці довжини сегментів;

$$m_{\Delta l} = \sqrt{2}m_{l_1}, \quad (2.25)$$

m_L – СКП награвіювання перетинів КВС, що дорівнює 2 мкм.

З аналізу формули (2.23) слідує, що похибки вимірів, які впливають на визначення фокусної віддалі можна розділити на дві групи. Перша група похибок діє обернено пропорційно різниці довжин відрізків Δl , а друга обернено пропорційно квадрату Δl . До першої групи відносяться похибки визначення довжини відрізка на знімку m_l та на КВС і похибка виміру довжини переміщення КВС m_d . До другої – похибка визначення різниці довжин відрізків $m_{\Delta l}$.

В такому випадку похибка $m_{\Delta l}$ матиме найбільший вплив на значення фокусної віддалі, ніж решта похибок. Тому, з метою мінімізації похибки $m_{\Delta l}$, рекомендується виконувати виміри на перехрестях КВС в центральній частині знімка, з умовою, що координата $z = \text{const}$. Тоді, похибка визначення різниці довжин відрізків буде залежати тільки від точності виміру абсцис x .

З вище викладеного слідує, що максимальної точності способу можна досягнути збільшенням довжини вимірюваного сегменту, водночас не збільшуючи величину переміщення ЦНЗК мікрометричним гвинтом. Тому запропонований спосіб варто застосовувати для визначення фокусних віддалей короткофокусних камер.

Для апробації способу визначали фокусну віддаль цифрової знімальної камери Canon EOS 450D № 2280509198 при середньому значенні фокусної віддалі для фіксованої позначки 18 мм. Для реалізації способу отримано декілька серій знімків КВС з різними параметрами d і L . В результаті досліджень були вибрані оптимальні значення – $L=160$ мм та $d=80$ мм, за яких апіорна точність визначення фокусної віддалі камери буде максимальною – 6,1 мкм.

За отриманими зображеннями вимірювали координати на відповідних перетинах КВС в програмному пакеті Digital, а саме додатку Models.

В результаті вимірів та обчислень фокусна віддаль камери склала 18,271 мм. Відповідне визначення фокусної віддалі для цієї камери, яка визначається тригонометричним методом, становить 18,265 мм (Пащетник, 2012), що не перевищує розрахункову точність.

Як вже зазначалось, даний спосіб варто застосовувати для визначення фокусної віддалі короткофокусних ЦНЗК.

Окрім поданих рекомендацій, вибір способу визначення фокусної віддалі ЦНЗК варто здійснювати враховуючи наявність відповідних технічних засобів, параметри цифрової камери та умови виконання НЦЗ.

2.2 Дослідження дисторсійних спотворень цифрової неметричної знімальної камери

Як зазначалося вище, застосування неметричних цифрових камер неможливе без їх періодичного калібрування, яке необхідне для одержання точної і достовірної інформації із цифрового зображення. Згідно з задачами дисертаційної роботи реалізовано дослідження дисторсійних спотворень.

Для дослідження створено просторовий тестовий полігон, який являє собою схематичну модель виходу льодовиків. Тобто, у відповідному масштабі (зменшеному) відтворено віддаль до льодовика, базис знімання та конфігурацію виходу льодовика.

Тестовий полігон знаходиться у холі 6 поверху Інституту геодезії Національного університету «Львівська політехніка». Тестовий полігон являє собою частину стіни холу, на яку нанесені опорні та контрольні марки (рис. 2.13). Параметри полігону: ширина – 4, 5 м, висота – 3 м, глибина – 1,5 м, кількість марок – 47, з них: 9 – опорні, 38 – контрольні.



Рис. 2.13 Просторовий калібрувальний тестовий полігон

Зразок марки подано на рис. 2.14 . Товщина штрихів марки – 2 мм.



Рис. 2.14 Зображення марки калібрувального тест-об'єкту

Координати перехресть опорних та контрольних марок визначали електронним тахеометром Leica TCR 405 Ultra (Leica TCR 405) у режимі вимірів Standard (тривалість виміру 3-6 с.) без відбивача. Віддаль до тест-об'єкта становила від 7 м до 9 м. Точність вимірів – 2 мм + 2 ppm.

Для виконання наземного цифрового стереофотограмметричного знімання калібрувального тестового полігону обрано камери Canon EOS 450D № 2280509198 (надалі Canon EOS 450D №1), Canon EOS 450D №2280509273 (надалі Canon EOS 450D №2) з фокусними віддальми 18 мм, 24 мм, 35 мм, 55 мм та Canon EOS 6D з фокусними віддальми 16 мм, 24 мм, 35 мм (EOS digital rebel XSi, Canon EOS 6D).

Перед зніманням обчислено апріорну оцінку точності визначення фотограмметричних координат перехресть марок для нормального випадку знімання ($\alpha=\omega=\kappa\leq 3^{\circ}-5^{\circ}$) за формулами в (Kurczyński, 2006) (таблиця 2.5). Значення СКП розраховані для таких параметрів: $m_p = m_x = m_z = 5 \text{ мкм}$.

Для відтворення об'єктів на зображенні з дискретних приймачів, в літературі запропоновано обмежити смугу пропускання просторових частот частотою Найквіста. Щоб визначити розрізнення на місцевості R використовують вираз

$$2 \Delta_{x,z} \leq R \leq 2\sqrt{2} \Delta_{x,z}.$$

Таблиця 2.5

Апріорна оцінка точності фотограмметричних координат

Canon EOS 450D ($l_x = 22,2 \text{ мм}$, $l_y = 14,8 \text{ мм}$)					
$f, \text{ мм}$	$Y_\phi, \text{ м}$	$B, \text{ м}$	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 з відкритим програмним кодом GML Camera Calibration Toolbox (GML C++ camera calibration toolbox). Для калібрування камери в GML Camera Calibration Toolbox потрібні тестові шаблони – знімки шахової дошки з різних ракурсів (рис. 2.15).

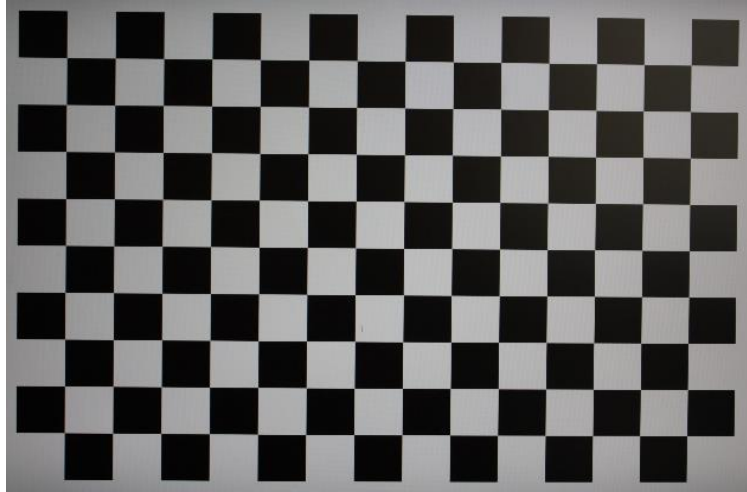


Рис. 2.15 Тестовий шаблон шахової дошки

Відповідно, отримано знімки для обох камер Canon EOS 450D та Canon EOS 6D з різних ракурсів та з різними кутами нахилу.

За тестовими шаблонами виконано калібрування знімків тестового полігону.

Отримані цифрові знімки (до і після врахування дисторсійних спотворень) передають у вікно «Зовнішнє орієнтування» цифрової фотограмметричної станції, наприклад «Дельта-2» (Digitals), попередньо задавши параметри камери та каталог опорних точок (перехресть марок), і виконують орієнтування знімків.

Подальше опрацювання виконують у програмному пакеті Digitals, а саме вимірюють координати (X, Y, Z) перехресть контрольних марок на цифрових знімках до і після усунення дисторсійних спотворень.

В подальшому порівнюють вимірні значення, отримані у програмному пакеті Digitals (для всіх знімків) з еталонними, тобто вимірними електронним тахеометром. Таким чином, отримують значення похибок до і після усунення дисторсійних спотворень.

Необхідно зазначити, що на значення залишкових похибок також впливають похибки за рельєф, оскільки об'єкт знімання побудований таким чином, що присутній різкий перепад рельєфу. Тому, визначимо допустиму глибину калібрувального тестового полігону.

Граничне зміщення точки за рельєф на знімку приймається рівним $\delta h = 0,2 \text{ мм}$.

Обчислимо допустимий перепад глибини полігону за формулою:

$$h = \frac{H * \delta h}{r}, \quad (2.26)$$

і отримаємо $h = 6,36 \text{ см}$, що свідчить, що в нашому випадку максимальний перепад глибини полігону не повинен перевищувати 6,36 см.

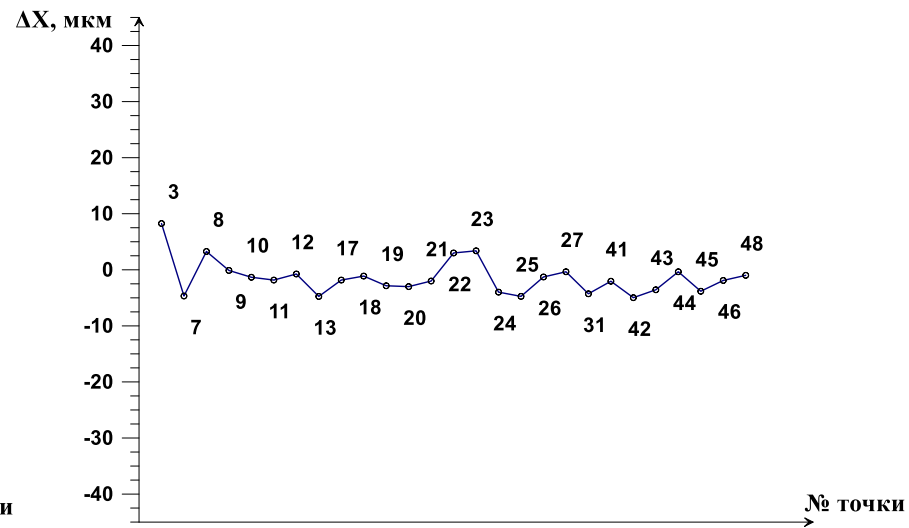
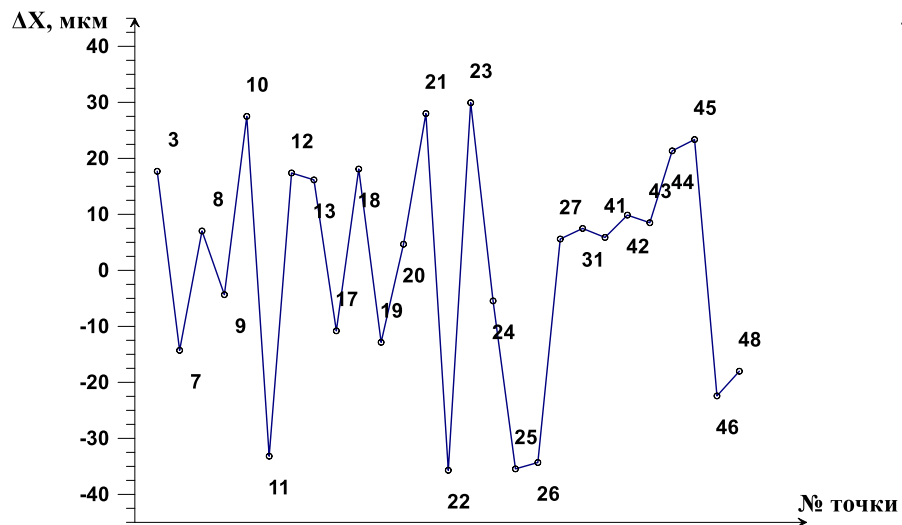
Визначимо похибки за рельєф δh для $h = 1,5 \text{ м}$ з формули (2.26) для досліджуваних камер (таблиця 2.6).

Таблиця 2.6

Значення похибок за рельєф

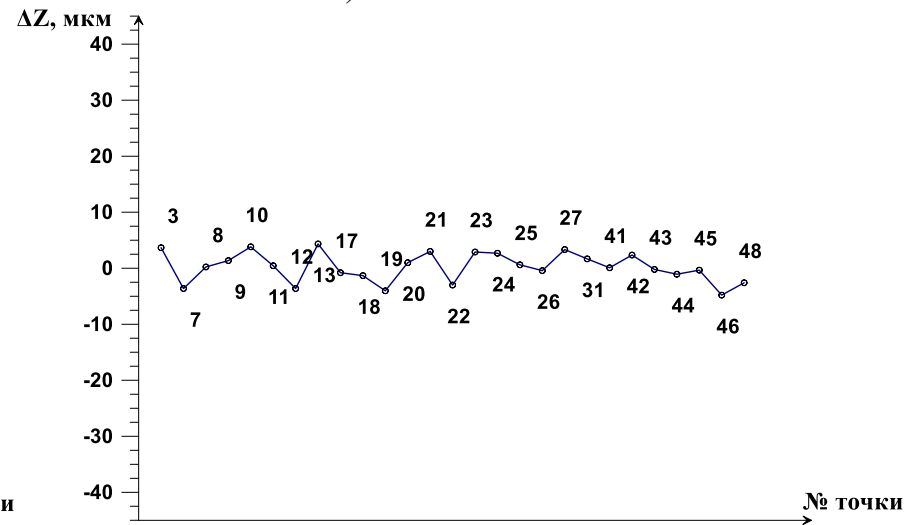
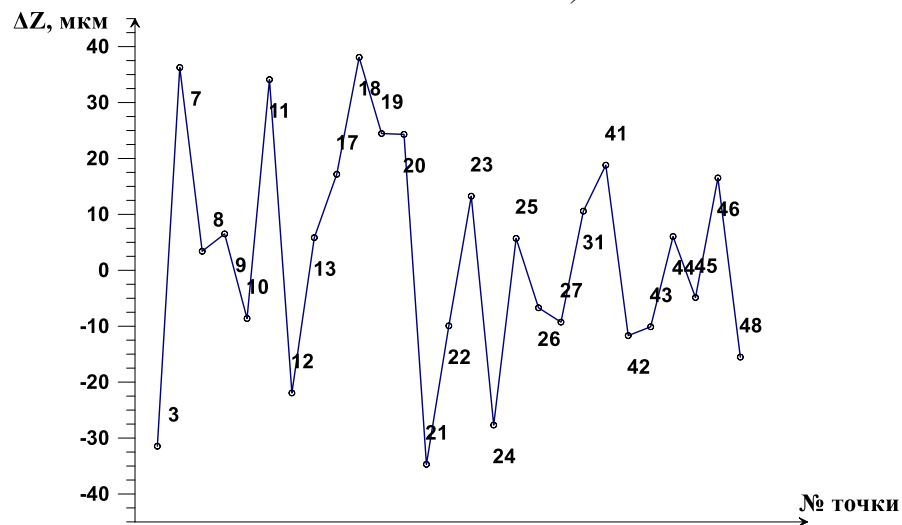
Canon EOS 6D ($l_x = 36 \text{ мм}$, $l_y = 24 \text{ мм}$)			
$H, \text{ м}$	$r, \text{ мм}$	$h, \text{ м}$	$\delta h, \text{ мм}$
6,5	21.5	1.5	5.0
Canon EOS 450D ($l_x = 22,2 \text{ мм}$, $l_y = 14,8 \text{ мм}$)			
$H, \text{ м}$	$r, \text{ мм}$	$h, \text{ м}$	$\delta h, \text{ мм}$
4,5	13.3	1.5	4.4
7			2.9
8,5			2.3
10			2.0

Для аналізу результатів дослідження наведемо графіки різниць величин координат контрольних точок до і після їх врахування дисторсійних спотворень. Для прикладу подано графіки для цифрової камери Canon EOS 450D №2280509273 для фокусної віддалі 18 мм по осях X та Z (рис. 2.16).



а)

б)



в)

г)

Рис. 2.16 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.

Наведені результати демонструють, що вплив на точність визначення координат точок об'єктів при НЦЗ мають не тільки дисторсійні спотворення, а й величини перепадів рельєфу.

2.3 Дослідження точності побудови хмари точок методом наземного лазерного сканування

Наземне лазерне сканування є одним з найефективніших методів забезпечення високоточних і щільних точкових хмар, які можуть бути застосовані для вимірювання об'єктів земної поверхні, моніторингу деформацій, побудови тривимірних просторових моделей та вирішення інших задач в галузі наук про Землю (Soudarissanane, Lindenbergh, Menenti & Teunissen, 2009, 2011, Shan & Toth, 2018).

Ця активна методика дистанційного зондування має низку переваг в порівнянні з іншими методами знімання (van Ree & Fugro–Inpark, 2006). НЛС дозволяє здійснювати безпосереднє, швидке, безконтактне та точне вимірювання об'єктів та дає змогу одразу отримувати інформацію про досліджуваний об'єкт у вигляді хмари точок, що підвищує точність вимірів (Schneider, 2009, Blaskow & Schneider, 2014).

Принцип роботи лазерних сканерів, який пов'язаний з вимірюванням не окремої точки, а хмари точок, істотно ускладнює процедуру калібрування (Rietdorf, Gielsdorf & Gruendig, 2004). За принципом функціонування моделі сканерів різняться, тому досі не існує єдиного підходу до моделей та методик калібрування лазерних сканерів. Найвідомішими роботами, що базуються на використанні моделей похибок теодолітів або електронних тахеометрів для лазерних сканерів, є роботи D.D. Lichti (Lichti, 2007, 2008, 2009, 2010 a, b, Ю. Решетюка (Reshetyuk, 2006, 2009) та T. Schultz (Schulz & Ingensand, 2004, Schulz, 2008), в яких виконано узагальнення цих моделей. Для калібрування за такими

моделями похибок використовують тестові полігони з калібрувальними марками у вигляді сфер, плоских марок або тестових площин. Складність полягає у створенні полігону, який повинен бути просторовим для правильного врахування всіх похибок. Другий відомий підхід ґрунтується на калібруванні конструктивних елементів лазерних сканерів. Цей підхід розглянуто в роботах (Reshetyuk, 2009). Недоліком такого методу є можливість його реалізації тільки в лабораторних умовах з використанням спеціального високоточного устаткування.

Передовсім зазначимо, що треба чітко розмежувати умови, за яких необхідно виконувати калібрування. Основні випадки, в яких варто перевіряти сканер: міжсезонна перевірка – здійснюється з метою профілактики в міжсезонний період; поточна періодична перевірка – перед виконанням польових робіт; почергова перевірка – після довгого транспортування у важких умовах або за інших нехарактерних для експлуатації навантажень; часткова технологічна перевірка – контроль збереження основних геометричних умов на кожній станції після переходу на неї, а також щоденно перед початком вимірювань (Катушков, Шульц & Сосса, 2012, Шульц & Сосса, 2015б).

Як зазначалось вище, калібрування сканерів є неможливим без використання спеціального високоточного устаткування (Bae & Lichti, 2007), відомості про внутрішню зміну сигналу системи часто невідомі, а підходи, керовані моделями, є непрактичними (Tan, Zhang, Shen & Cheng, 2018). З іншого боку, існуючі процедури калібрування вимагають трудомісткого отримання окремих опорних наборів даних з однорідними характеристиками відображення (Lichti, Stewart, Tsakiri & Snow, 2000). Для дослідження впливу похибок наземного лазерного сканування розглянемо та проаналізуємо їх джерела.

Похибки НЛС умовно можна розділити на чотири групи (Staiger, 2003, 2005):

- Інструментальні;
- Викликані властивостями об'єкту сканування;
- Вплив довкілля;
- Похибки прив'язки (методологічні).

Інструментальні похибки носять як систематичний так і випадковий характер і залежать від конструкції сканера. Оскільки наземний лазерний сканер складається з двох блоків, відповідно, похибки поділяють на похибки кутомірного та віддалемірного блоків (Lichti, Brustle & Franke, 2007).

Основним джерелом похибок, викликаних властивостями об'єкту сканування, є відбиваюча здатність поверхні об'єкта, оскільки сканер працює в режимі «без відбивача» (Lindenbergh, Pfeifer & Rabbani, 2005). Відбиваюча здатність об'єкту може бути визначена як відношення потужності відбитого до падаючого сигналу лазера (Reshetyuk, 2009). Це функція наступних чинників: властивостей матеріалу об'єкта (електропровідність, електрична та магнітна проникність, колір об'єкта), довжина хвилі лазерного променя, кут падіння, шорсткість поверхні, яка пов'язана з довжиною хвилі і кутом падіння лазерного променя, температура об'єкта, вологість об'єкта (Carrea et al., 2016). Очевидно, темні об'єкти (чорного кольору) поглинають більшу частину падаючого лазерного променя і відображають слабкий сигнал; яскраві об'єкти з високим коефіцієнтом відбиття дозволяють точніше вимірювання віддалі і, отже, отримувати надійніші результати (Jaafar, Meng & Sowter, 2018).

Вплив довкілля пов'язаний з такими екологічними чинниками як температура, тиск, відносна вологість, освітлення, вібрації і т. д. (Bucksch, Lindenbergh & Van Ree, 2007).

Похибки прив'язки хмари точок до певної системи координат виникають при неправильному виборі параметрів сканування, визначенні координат точок стояння сканера і контрольних марок (сфер), а також при камеральному опрацюванні (реєстрації) даних сканування (Lichti, Gordon & Tipdecho, 2005, Lichti & Licht, 2006).

Хоча більшість виробників надають технічну інформацію про ефективність роботи своїх лазерних сканерів, рекомендується виконувати експерименти для перевірки якості даних (Pesci & Teza, 2008, Pesci, Teza & Bonali, 2011)

Розглянемо детальніше існуючі дослідження впливу похибок на результати наземного лазерного сканування.

Аналіз сучасного стану, технічних можливостей методу наземного лазерного сканування та існуючих методик калібрування наземного лазерного сканера розглянуто в працях (Шульц, 2010, 2011 а, б). Описано концепцію системного калібрування наземних лазерних сканерів та базову математичну модель, що використовується для калібрування. Наводиться приклад вирішення однієї з методичних задач, що виникають при калібруванні, а саме визначення моделі похибок сканера. Автори зазначають, що отримані СКП відповідають точності, що заявлена виробником сканера. Проте, інформації про досліджуваний сканер не подано.

В публікації (Jaafar et al., 2018) подано результати кількісного аналізу впливу похибок наземного лазерного сканера з метою моніторингу. Авторами проведено експериментальні дослідження лазерних сканерів Leica Scanstation P20 і P40 в лабораторних умовах, з метою мінімізації впливу похибок за атмосферні умови. Відповідно, щоб зменшити похибки, пов'язані з об'єктом сканування, рекомендовано обирати плоску поверхню білого кольору. В результаті визначено похибки для 24 різних параметрів. Для кожного оцінювали середньоквадратичні і максимальні похибки. Як зазначають автори, середня похибка краща, ніж опублікована виробником точність координат точок, з іншого боку, максимальна похибка більша за очікувану, і сягає 5 см.

Варто зазначити, що очевидним недоліком дослідження є невідповідність між хмарами точок, а формулювання однозначних висновків ускладнюється відсутньою можливістю порівняння результатів для різних віддалей.

Питання визначення оптимального за точністю режиму сканування також розглянуто у статті (Азаров & Карелина, 2018). Відзначено, що у різних моделей лазерних сканерів інформація про технічні характеристики приладу, як правило, не має єдиного вигляду і у кожного виробника різна. Описана методика визначення максимальної оптимальної щільності сканування приладом TOPCON GLS-1500 для сканування об'єкта, розташованого на різних віддальях від сканера. За результатами виконаних досліджень зроблені висновки про доцільність використання способу задання щільності сканування в приладі TOPCON GLS-

1500 та мінімального інтервалу між точками в горизонтальній і вертикальній площині, з метою підвищення точності наземного лазерного сканування.

Порівняння результатів дослідження впливу похибок реєстрації хмар точок в єдину точкову модель, яку відносять до групи методологічних похибок НЛС запропоновано в публікації (Маліцький, 2017). Метою роботи є визначення достовірності одержаних результатів з використанням автоматизованих методів орієнтування (реєстрації) сканів. Автором подано методику, що базується на створенні геометричної мережі, в якій би одна зі станцій сканування (базисна) була розташована на відносно більшій віддалі від інших. Така станція повинна охоплювати більшу частину об'єкту сканування та усі об'єкти (марки, сфери) за якими проводитиметься реєстрація сканів. До базисної станції прив'язують решту сканів і в результаті одержують точкову модель в системі координат базисного скану без накопичення похибки визначення центру контрольних марок (сфер). Для реєстрації сканів вибрано повністю автоматизовані методи такі як суміщення спільних точок (об'єктів) за допомогою визначених спільних характерних точок та/або контрольних марок, а також ітеративний метод пошуку найближчої точки у ПЗ Faro Scene 6.2.4.30 та Autodesk Recap 3.1.

Варто зазначити, що використання базисного скана, з визначеними координатами контрольних марок, дає можливість зменшити похибку реєстрації сканів. Проте, як зазначає автор, під час виконання практичних робіт методом ітеративного пошуку найближчої точки, виявлено, що використання різних версій одного й того ж програмного продукту дає різні результати реєстрації сканів, що свідчить про ненадійність обчислених параметрів реєстрації сканів.

У роботі (Корасік & Корбосова, 2004) розрахунок параметрів сканування виконують на основі попереднього розрахунку точності лазерного сканування. Проте, такий підхід має низку істотних недоліків. По-перше, не враховується той факт, що точність сканування істотно знижується при збільшенні кутів падіння лазерного променя на поверхню об'єкта, і, по-друге, при такому розрахунку неможливо встановити необхідну кількість станцій сканування.

Раціональніший і правильніший підхід запропоновано в роботі (Gairns, 2008), де розрахунок виконано за умови обмеження максимально можливого кута падіння лазерного променя на поверхню об'єкта.

Аналіз точності лазерних скануючих систем подано в публікації (Boehler, Vicent & Marbs, 2003). Дослідження полягало у виконанні стандартизованих тестів лазерними сканерами семи виробників для ряду різних тестових об'єктів. Авторами досліджено вплив похибок виміру кутів та віддалей, просторового розрізнення, ефектів на краях об'єктів сканування та відбивної здатності поверхонь. Визначення впливу «ефекту країв» полягало у отриманні даних про те, скільки точок буде зареєстровано з низькою точністю через ефекти на краях об'єкта сканування.

Для оцінки точності виконаних вимірів порівнювали віддалі для різних матеріалів з білою поверхнею. Варто зазначити, що сканування виконували на фоні неба, що дозволило виключити вплив об'єктів, розташованих позаду цієї пластини. Автори повідомляють про деякі важливі переваги і недоліки сканерів, апаратного та програмного забезпечення сканування, але така інформація базується на досвіді та суб'єктивних враженнях, а не на систематичних дослідженнях.

У роботах (Schulz & Ingensand, 2004, Ingensand, 2006) використовували лазерний сканер Zoller + Fröhlich Imager 5003 3D для дослідження дорожнього покриття площею 15 м x 5 м, а також отримано дані для створення математичної топологічної моделі і системи виведення водозбору. Сканування виконували за допомогою Leica Geosystems TCA 1800 Total Station. Для реєстрації сканів обрано сферичні марки діаметром приблизно 12 см і 15 см, що встановлені на штативах. Для геоприв'язки сканів визначали координати сфер шляхом їх заміни на призми. Дослідники виявили, що найбільший вплив на точність має кут падіння і колір поверхні дороги, і, що сліди шин призвели до набагато більшого рівня шумів, ніж очікувалося. Окрім того, встановлено, що рівень шуму збільшувався прямо пропорційно збільшенню діапазону сканування. В результаті отримано розріджену і згладжену хмару точок.

Варто зазначити, що авторами розроблено метод зменшення рівня шумів, шляхом опрацювання даних в оригінальній полярній системі координат сканера.

Комплексне дослідження впливу змінних та точності наземного лазерного сканера Zoller + Fröhlich Imager 5003 подано в роботі (Schulz & Ingensand, 2004). Тестування зосереджено не тільки на аналізі системних вимірів віддалей і кутів, але й на інших систематичних ефектах, включаючи похибку осей, ексцентриситет центру сканування, похибку колімаційної осі і похибку горизонтальної осі. Об'єктом сканування слугувала біла паперова марка з чорною шкалою. Сканер і марку розташовували на одній висоті. У «Статичному режимі» максимальна різниця між тисячами вимірювань однієї позиції збільшується приблизно з 5 мм для 5 м до приблизно 30 мм для діапазону 50 м. В іншому експерименті сканували білі сфери, розташовані на віддалі близько 1 м одна від одної. Потім визначали координати центрів сфер за допомогою двох різних методів і порівнювали горизонтальні віддалі до центральних точок сфер з номінальними віддальми. Варто підкреслити, що результати даного дослідження також підтверджують, що похибка збільшується в міру збільшення діапазону сканування.

Метричні показники лазерного сканера з високою розрізнявальною здатністю Suрах 2400 детально досліджено в праці (Gordon, Lichti, Stewart & Tsakiri, 2000). Авторами розроблено ряд строгих експериментів для визначення точності приладу. Виконано повторні вимірювання кругових світловідбиваючих марок, встановлених на базисних опорах в різний час. Як свідчать результати досліджень, точність виміру віддалі варіювалась в діапазоні 4-15 мм, а точність сканера – від 3 до 5 мм, відповідно до опублікованих технічних характеристик. Варто зазначити, що діапазон похибок точності виміру віддалі більший ніж очікувалося, що може свідчити про пошкодження сканеру в процесі транспортування.

Вивчення впливу відбиття лазерного променя від поверхонь різних матеріалів на точність лазерного сканування подано в праці (Fidera, Charman & Hong, 2004). Наземний імпульсний лазерний сканер Suрах 2500 використовували для сканування кількох циліндрів, виготовлених з різних матеріалів: алюміній,

латунь, чавун, оцинкована сталь, нержавіюча сталь, скло і чорний ПВХ на віддалі 2,9 м. Діаметр циліндрів становив від 30 до 100 мм. Максимальний кут покриття ($180^\circ = 50\%$) визначали як кут між лініями від центру циліндра до двох крайніх дотичних точок на циліндричній поверхні, видимій в хмарі точок. Результати показали, що хмари точок чорного ПВХ і циліндрів з нержавіючої сталі дали найменші кути покриття (менше 20°), а точкові хмари з латуні і керамічних труб давали кути покриття 165,13 (45,9%) і 126,49 (35,1 %). Дослідники рекомендують, щоб кут охоплення був принаймні від 20 до 25% для того, щоб сформувати правильну модель для точного визначення діаметру циліндра і розташування його центру. Крім того, виявлено, що застосування матової фарби та маскувальної стрічки може призвести до збільшення кута покриття точкових хмар на 50% - 60% у порівнянні з попередніми умовами.

Дослідження точності наземних лазерних систем сканування запропоновано у роботі (Mechelke, Kersten & Lindstaedt, 2007). Виконано порівняння точності декількох наземних лазерних сканерів: Trimble GX, Mensi GS100 / 200, Leica ScanStation, Z + F IMAGER 5006 і Faro LS880 HE. Подано та проаналізовано результати тестування цих систем: отримано віддалі між точковими хмарами 3D-тестового полігону, точність вимірювань віддалей у порівнянні з еталонними, точність компенсації кута нахилу, впливу кута падіння лазерних променів, дослідження шуму та впливу кольору об'єкта на вимірювання віддалі.

Дослідження на 3D-тестовому полігоні показали, що значення діапазону похибок, варіюється від 41 мм до 76 мм для чотирьох сканерів. Цей тест продемонстрував, що хмара точок, отримана імпульсними сканерами містить систематичний зсув до + 6 мм. Тестування точності вимірювань віддалі в порівнянні з еталонними віддальми показали, що результати здебільшого відповідали технічним характеристикам. Впливом кута падіння на точність можна знехтувати для імпульсних сканерів, тоді як фазові сканери показують значні відхилення, якщо кут падіння більший 45° . На точність також не впливає діаметр лазерного променя по відношенню до кута падіння, як зазначають автори. При дослідженні впливу кольору об'єкта на якість вимірювання віддалі виявлено, що

для сканерів Faro і Trimble деякі кольори об'єктів демонструють значний вплив на точність визначення віддалі. Всі дослідження чітко показали, що на сканери, що використовуються, все ще впливають інструментальні похибки, які можуть бути зменшені калібруванням приладів.

У дослідженнях (Tan & Cheng, 2015, 2016, 2017, Tan, Cheng, Ding & Zhang, 2015.) подано результати експериментальних робіт, що демонструють залежність потужності повернутого сигналу від віддалі сканування. Для тестування відібрано вісім тестових марок з різними матеріалами та характеристиками поверхні та наземний лазерний сканер Faro Focus3D 120. Оскільки, врахувати вплив віддалі, кута падіння та характеристик поверхні окремо неможливо, пропонується використання значення інтенсивності для кількісного моделювання похибок. Істотною перевагою запропонованого способу є те, що попередньої інформації про характер відбиття відсканованої марки, геометрію сканування та механізм інструменту не потрібно. Результати показують, що точність вимірювання віддалі може бути значно поліпшена після встановлення функції між похибками інтенсивності та віддалі, що має велике значення для якості, надійності та подальшої обробки даних НЛС. Автори вважають, що похибки вимірювання віддалі більші 5 мм викликані дзеркальними відбиттями (Sun et al., 2017).

Як відомо, на додаток до 3D-координат, системи НЛС одночасно вимірюють потужність сигналу зворотного розсіювання лазера відсканованих точок та записують його як значення інтенсивності (Pfeifer & Briese, 2007, Pfeifer, Höfle, Briese, Rutzinger & Haring, 2008). Інтенсивність зазвичай використовують як атрибут для реалістичної візуалізації хмар точок. Однак, ця величина має значно більший потенціал, який все частіше використовують для складніших завдань, таких як ідентифікація та класифікація даних.

На значення інтенсивності (Wujan, Burger, Mettenleiter, & Neitzel, 2017).впливають системні параметри сканера, довкілля, кут падіння, віддалі між лазерним сканером та об'єктом. Внаслідок складного рельєфу поверхні, фізико-хімічних властивостей, кольору та форми об'єктів сканування, відбувається

спотворення відбитого лазерного випромінювання, що призводить до похибок вимірювання (Kukko, Kaasalainen & Litkey, 2008).

Як свідчить аналіз останніх досліджень, для компенсації похибок вимірювання віддалі варто враховувати лише конфігурацію та властивості поверхні сканування, оскільки атмосферні умови біля поверхні Землі є відносно стабільними, а прилади, як правило, не змінюється протягом однієї кампанії спостережень. Вплив віддалі та кута падіння на точність вимірювання віддалі детально вивчено, тоді як похибки вимірювання віддалі, спричинені властивостями поверхні, досліджують відносно недавно (Wujanz, Burger, Mettenleiter & Neitzel, 2017). Безвідбивний характер НЛС збільшує можливість впливу похибок вимірювання віддалі через ослаблення імпульсу повернутого сигналу відбиваючими поверхнями (Voegtle, Schwab & Landes, 2008, Voegtle & Wakaluk, 2009).

Похибки вимірювання віддалі (Dorninger, Nothegger, Pfeifer & Molnár, 2008), спричинені властивостями шорстких і тьмяних поверхонь, зазвичай становлять кілька міліметрів. Однак ці похибки можуть суттєво зрости до сантиметрових і навіть дециметрових значень Pfeifer et al., 2008) для об'єктів з відносно гладкою або глянцевою поверхнею (наприклад, вода (Бабушка, 2012, Höfle, Vetter, Pfeifer, Mandlbürger & Stötter, 2009), свіжий лід (Avian, Kellerer-Pirklbauer & Lieb, 2018), метал (Suchocki & Katzer, 2016), де дзеркальні відбиття домінують над дифузними (Höfle & Pfeifer, 2007).

Проаналізувавши вищезгадані роботи можна запропонувати рекомендації для кожної з груп джерел похибок НЛС. Для зменшення впливу інструментальних похибок рекомендовано використання приладу з низькою дивергенцією променя та високою точністю кутових вимірів, розташування сканера якомога ближче до об'єктів сканування, застосування апаратних фільтрів та компенсатора.

Для мінімізації похибок, що викликані властивостями об'єкту сканування, рекомендовано обирати сканер з меншою довжиною хвилі, уникати дзеркальних об'єктів, виконувати сканування з високим кутом падіння та видаляти помилкові точки за допомогою фільтрів та ручного редагування.

Похибки за вплив довкілля можна зменшити шляхом встановлення сканера на стабільній поверхні, контролю температури сканера та об'єкта сканування, атмосферного тиску та вологості, а також обираючи сканери з оптичними фільтрами (Zogg, 2008).

Зменшити вплив похибок, пов'язаних з методикою сканування, рекомендовано шляхом встановлення максимального кута падіння, що не перевищує 65° та кроку сканування, що близький до 86% величини діаметру лазерного променя. Застосовувати метод реєстрації сканів за допомогою координат контрольних марок (сфер).

Як свідчить аналіз літературних джерел, особливу увагу при дослідженнях НЛС варто приділити вивченню питання впливу віддалі сканування на спотворення відбитого лазерного випромінювання (Kaasalainen, Vain, Krooks & Kukko, 2009, Kaasalainen, Jaakkola, Kaasalainen, Krooks & Kukko, 2011).

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 (Hlotov & Marusazh, 2019 a, b). 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.

Наземне лазерне сканування виконували в лабораторних умовах з стабільними параметрами довкілля. Також, варто зазначити, що кут падіння при скануванні був близький до нуля, тому його вплив не досліджується.

Для досліджень використано наземний лазерний сканер Faro Focus 3D S120 (LLS061101314) з довжиною хвилі 905 нм, який подає геометричну інформацію та інтенсивність повернутого сигналу, що записана в 11 бітах [0 - 2048]. Основні технічні характеристики FARO Focus 3D подано в (Laser scanner focus 3D S120).

Для виконання експериментальних робіт створено спеціальну тестову марку (рис. 2.17) – 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, тому не впливатиме на точність вимірів.

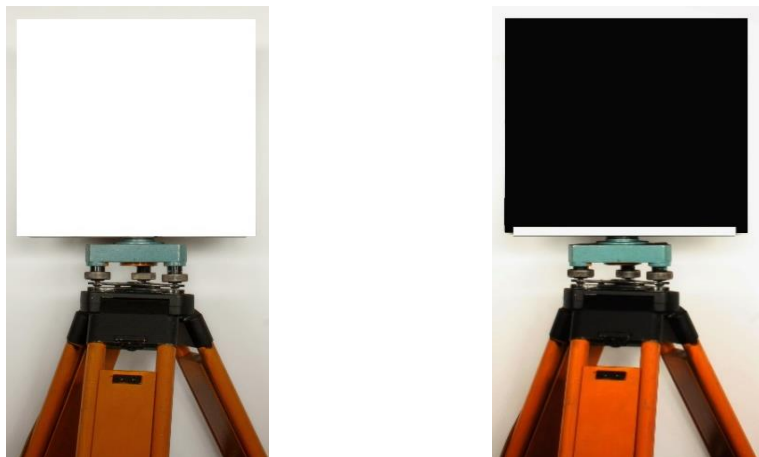


Рис. 2.17 Тестова марка

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. Потім марку обертали чорною стороною та повторювали сканування. Виміри повторювали на віддальх 1,5 м, 3 м, 5 м, 10 м (таблиця 2.7).

Таблиця 2.7

Параметри наземного лазерного сканера

Віддаль, м	Крок, °	Крок, мм
0.6	0.009	0.1
1.5	0.009	0.3
3.5	0.009	0.6
5	0.009	0.8
10	0.009	1.5

Відповідно до технічних характеристик, горизонтальний і вертикальний крок сканування становить $0,009^\circ$. Всього було отримано 10 сканів. Значення інтенсивності експортовано з хмари точок за допомогою стандартного програмного забезпечення Faro SCENE (FARO SCENE software).

Для оцінки результатів дослідження проаналізовано розподіл хмар точок в площинах YX та YZ центральних фрагментів (15x15 точок) білої та чорної сторін марок. Середні квадратичні похибки координат Y і Z подані в таблиці 2.8

СКП координат Y та Z

Віддаль	0,6, м		1,5, м		3, м		5, м		10, м	
	m_y , мм	m_z , мм	m_y , мм	m_z , мм	m_y , мм	m_z , мм	m_y , мм	m_z , мм	m_y , мм	m_z , мм
Білий	0,4	0,1	0,5	0,2	1,0	0,1	1,9	0,1	4,1	0,2
Чорний	0,7	0,1	0,7	0,2	1,7	0,1	2,1	0,2	4,9	0,6

Результати розподілу хмари точок в площинах XY та XZ центральних фрагментів сканів білої та чорної сторін марок подано у Додатку А.

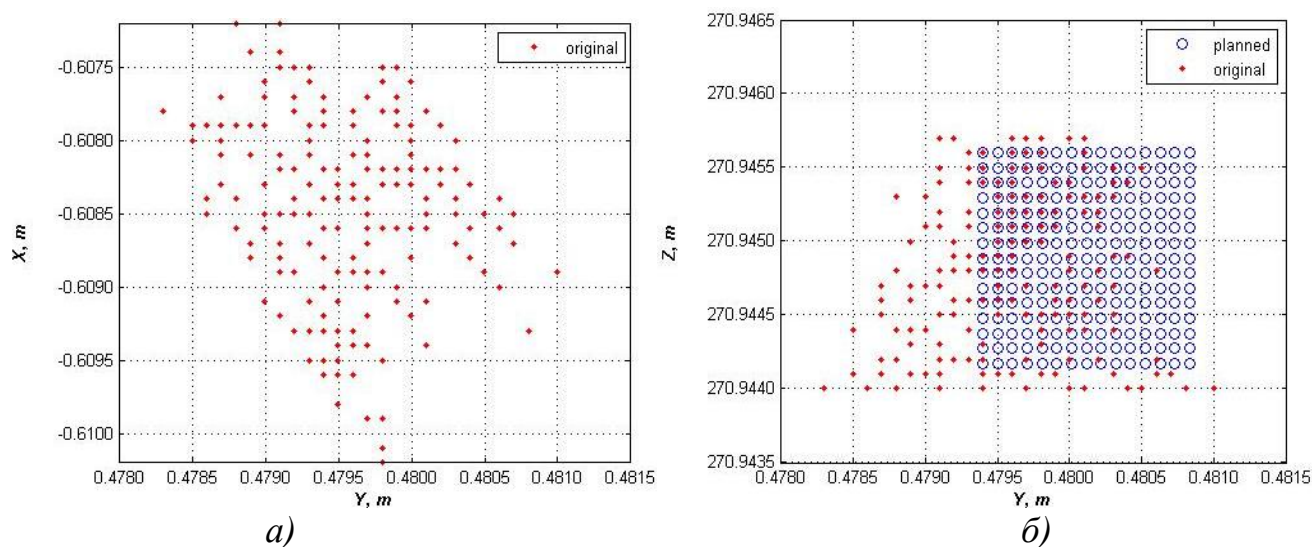


Рис. 2.18 Розподіл центрального фрагменту хмари точок чорної сторони марки в площинах YX (а) та YZ (б) для віддалі сканування 0,6 м

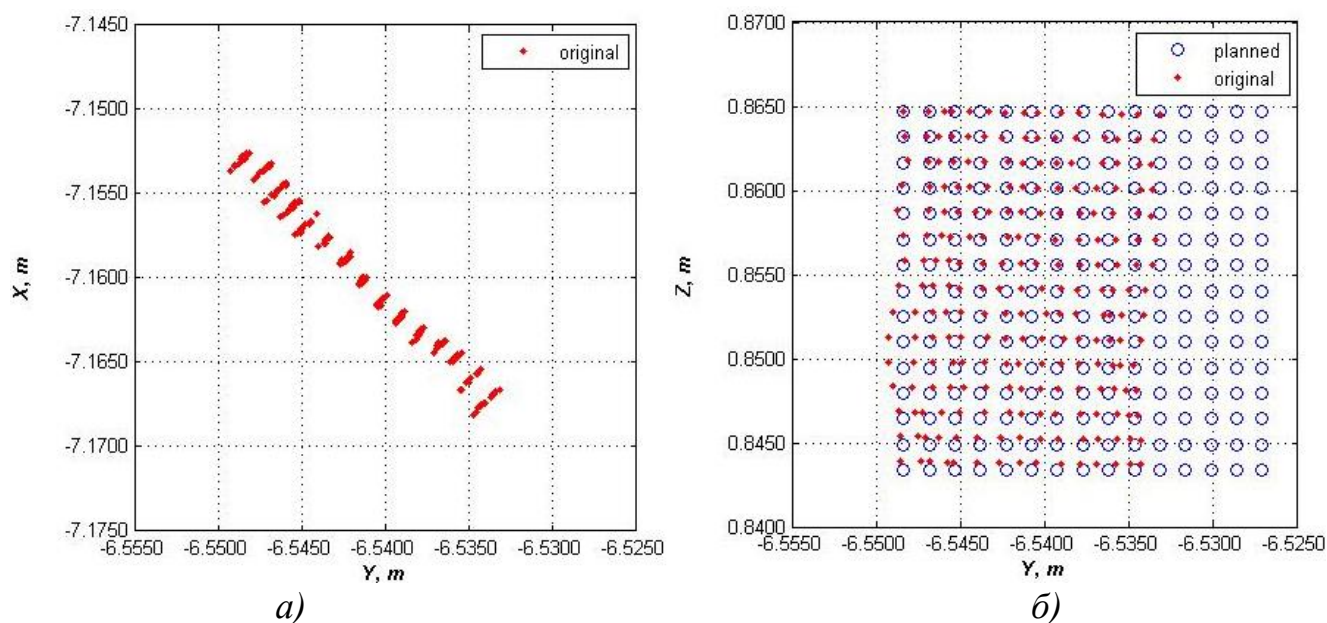


Рис. 2.19 Розподіл центрального фрагменту хмари точок білої сторони марки для віддалі сканування 10 м в площинах: а) YX; б) YZ

Найгірший результат отримано при скануванні чорної сторони марки з віддалі 0,6 м (рис. 2.18), а найкращий результат – для білої сторони марки з віддалі 10 м (рис. 2.19). 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 віддалі 0,6 м та 5 м (рис. 2.20 а). На рис. 2.20 б подано розподіл стандартного відхилення значень інтенсивності зі зміною віддалі.

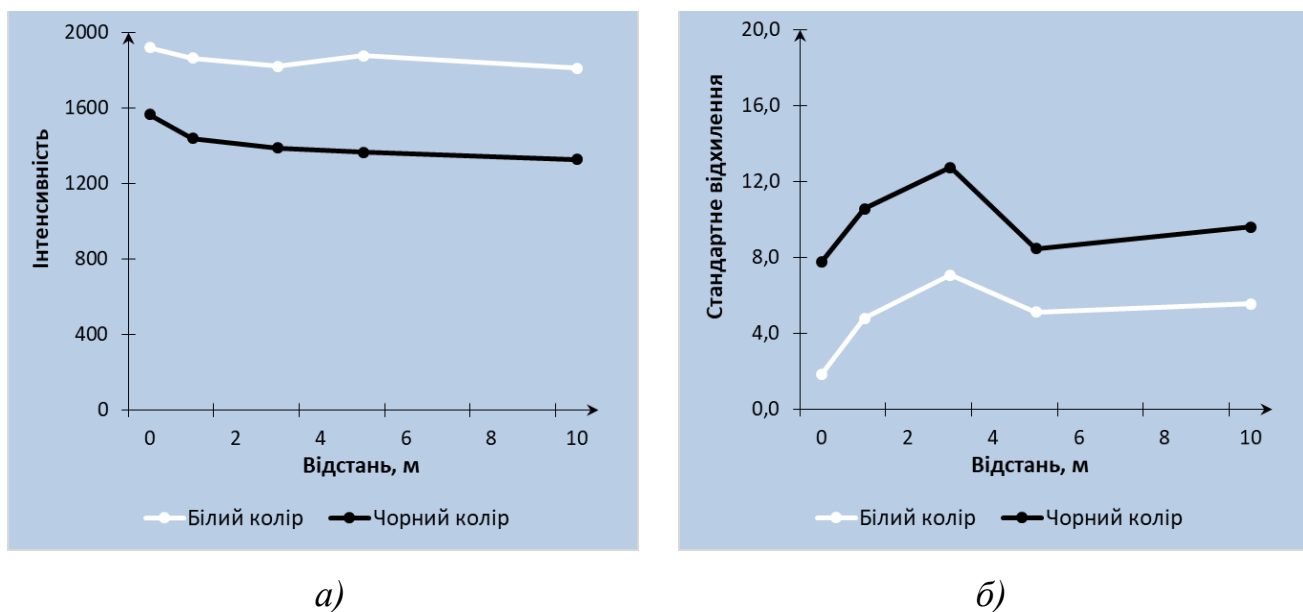


Рис. 2.20 Розподіл: а) значень інтенсивності залежно від зміни віддалі до об’єкта; б) стандартного відхилення інтенсивності зі зміною віддалі до об’єкта

Як видно з рисунка, значення стандартного відхилення найбільші для віддалі 3 м. Також, очевидно, що значення для білої поверхні марки значно менші. Це свідчить про однорідність значень інтенсивності повернутого сигналу для білої поверхні марки.

Враховуючи всі результати експериментальних робіт можна зробити висновок, що максимальну точність можна отримати в діапазоні сканування 5-

10 м. Водночас, для сканування з віддалі 0,6 м характерна неоднорідність хмари точок, а час сканування є більшим.

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

2.4 Висновки до розділу 2

Аналіз літературних джерел, що стосуються визначення елементів внутрішнього орієнтування та параметрів калібрування цифрових неметричних знімальних камер дозволив з'ясувати основні труднощі, що виникають під час розв'язання подібних задач.

Запропоновано і апробовано три способи визначення фокусної віддалі цифрової знімальної камери, які 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 наявність відповідних технічних засобів, параметри цифрової камери та умови виконання НЦЗ. Для камер, що застосовують для НЦЗ льодовиків пріоритетним є другий спосіб.

Досліджено точність визначення координат точок об'єкта до і після усунення дисторсійних спотворень. Варто зазначити, що необхідно враховувати вплив перепаду глибини об'єктів на дисторсійні спотворення. Залишкові похибки виміру координат точок після врахування дисторсійних спотворень не перевищують значення розміру піксела.

Розглянуто та проаналізовано чинники впливу та джерела похибок наземного лазерного сканування. Надано рекомендації для мінімізації кожної з груп похибок наземного лазерного сканування. Варто зазначити, що досі є суперечливими твердження про вплив деяких чинників, в тому числі властивостей об'єкта сканування.

Наведені дослідження демонструють залежність інтенсивності повернутого сигналу від віддалі та типу поверхні сканування. Тому, вибір оптимальних параметрів сканування варто здійснювати з врахуванням ефективності роботи сканера на різних віддалях та часу сканування.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІН ПОВЕРХНЕВИХ ОБ'ЄМІВ ОСТРІВНИХ ЛЬОДОВИКІВ

Провідними методами, впродовж останніх років, для дослідження острівних льодовиків є використання сучасних дистанційних засобів. Застосування методів наземного лазерного сканування та цифрового стереофотограмметричного знімання дають можливість значно підвищити точність отримання кількісних параметрів об'єктів дослідження, підвищити точність визначення змін об'ємів льодовиків та уникнути «мертвих» зон наземного лазерного сканування.

Технологічна схема запропонованої методики комплексного дослідження змін поверхневих об'ємів льодовиків приведено на рис. 3.1. Розглянемо основні технологічні етапи методики.

3.1 Створення технічного проєкту

Першим етапом запропонованої технологічної схеми є «Створення технічного проєкту». Виконання даного етапу передбачає обґрунтування науково-методичного забезпечення виконання робіт (наводиться перелік методик досліджень/нормативних документів, якими необхідно керуватися при виконанні робіт), матеріально-технічне забезпечення виконання робіт, календарний план робіт та обсяги робіт та основні вимоги до реалізації методики досліджень.

На сьогодні в Україні немає сучасних інструкцій чи нормативних документів про порядок проведення робіт з НЦЗ та НЛС. Тому при виконанні НЦЗ пропонується дотримуватись вимог викладених в (Лобанов, 1983), а при НЛС вимог інструкції користувача зазначених виробником наземного лазерного сканера. В описі наступних етапів запропонованої технологічної схеми викладено особливості та рекомендації до застосування відповідних методів для дослідження льодовиків.



Рис. 3.1 Технологічна схема методики комплексного дослідження

Для реалізації запропонованої технологічної схеми необхідно задіяти відповідне матеріально-технічне забезпечення. Прилади та засоби для виконання польових робіт можна поділити на дві основні групи: для знімання/сканування або інших вимірювальних робіт на досліджуваному об'єкті (цифрова камера, наземний лазерний сканер, ГНСС-приймач, електронний тахеометр та ін.) та для опрацювання матеріалів (марки, сфери та ін.). Для виконання камерального опрацювання необхідно здійснити вибір програмного забезпечення.

Важливим питанням є складання календарного плану робіт, однак зазвичай його дещо коригують безпосередньо в процесі виконання польових вимірювань, що пов'язано з погодними умовами (дощ та сніг можуть суттєво впливати на якість отриманих матеріалів) та наявністю транспорту.

Основні вимоги до реалізації методики повинні містити опис обсягу робіт та порядок їх виконання, основні методичні та технічні вимоги, яких необхідно дотримуватися під час виконання робіт. Також, вказують попередні параметри НЛС та НЦЗ, наводять схеми запланованого розташування станцій стояння сканера та контрольних марок (сфер) для НЛС, базисів та опорних точок для НЦЗ. Наводять результати розрахунку попередньої оцінки точності. Розглянемо детальніше деякі процеси, що стосуються реалізації методики досліджень.

Визначення параметрів наземного лазерного сканування. До основних характеристик наземного лазерного сканера відносять довжину хвилі лазера та діапазон сканування та точність вимірів. Обираючи наземний лазерний сканер, варто звернути увагу на відбивну здатність для досліджуваних об'єктів в різних спектральних діапазонах електромагнітного випромінювання. Наприклад, для досліджень снігового покриву, фірну та льоду найкращим вважають ближній інфрачервоний (NIR) спектральний діапазон. Одним з наземних лазерних сканерів, що працює в даному діапазоні, і який наразі активно застосовують для досліджень льодовиків є Riegl VZ-6000. Цей сканер випромінює ближній інфрачервоний лазерний імпульс із довжиною хвилі 1064 нм, що підходить для реєстрації відбиття льоду, снігу та фірну навіть на великих віддальх та має вбудовану оптичну камеру.

Також, варто звертати увагу на діапазон сканування сканера та точність вимірювань. Наведений як приклад сканер Riegl VZ-6000 дозволяє виконувати виміри в діапазоні 5-6000 м, з точністю 15 мм. Проте, не завжди є потреба у скануванні з великих віддалей. В такому випадку, варто обрати сканер з меншим діапазоном сканування, але кращою точністю вимірювань. Наприклад, Faro Focus 3D S120 з діапазоном сканування до 120 м та точністю вимірювань 2 мм.

Важливим є вибір параметрів налаштування наземного лазерного сканера. До них відносять: розрізнення, якість та діапазон сканування у горизонтальних та вертикальних кутах. Від вибору розрізнення сканування залежить крок сканування – віддаль між точками (в міліметрах або дюймах) за деякої віддалі сканування. Для прикладу, наведемо значення розрізнення та кроку сканування для Faro Focus 3D S120 у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Розрахунок кроку сканування

Розрізнення сканування	Крок сканування, град	Крок сканування, мрад	Віддаль сканування, м	Крок сканування, мм
1	0,009	0,16	100	16
1/2	0,018	0,31	100	31
1/4	0,036	0,63	100	63
1/5	0,045	0,79	100	79
1/8	0,072	1,26	100	126
1/10	0,09	1,57	100	157
1/16	0,144	2,51	100	251
1/20	0,18	3,14	100	314
1/32	0,288	5,03	100	503

Кутовий крок сканування, в першу чергу, корелює з детальністю (точністю), що необхідна для виконання робіт (Середович, Комиссаров, Комиссаров & Широкова, 2009). Тому, вибір кроку сканування здійснюють залежно від виду продукції, що створюватиметься за даними НЛС. Згідно запропонованої методики для визначення змін поверхневих об'ємів льодовиків застосовують цифрові моделі рельєфу. Як стверджують автори (Середович et al., 2009) у випадку сканування з метою створення топографічних планів та цифрових моделей

рельєфу для більшості сучасних лазерних сканерів кутовий крок сканування варто задавати в межах від $0,09^\circ$ до $0,14^\circ$ по горизонталі і вертикалі. Варто зауважити, що така величина кроку доцільна якщо розглядати тільки безпосереднє сканування поверхні об'єктів, де для реєстрації даних НЛС не застосовують контрольні марки чи сфери. Тому що, в іншому випадку, вибір кроку сканування також буде залежати від рекомендацій виробника наземного лазерного сканера щодо максимальної віддалі розташування спеціальних цілей (марок чи сфер) для їх коректного розпізнавання у процесі реєстрації сканів.

Залежно від обраного розрізнення сканування, автоматичне виявлення марки є ненадійним за певної віддалі від сканера. Наприклад, при використанні контрольних марок розміру A4 та сканування з розрізненням $\frac{1}{4}$, віддаль до сканера не повинна бути більшою за 15 м (Fryskowska, 2019). Більше того, для виявлення шахової дошки на плоскій марці програмному забезпеченню Faro Scene потрібні принаймні чотири точки сканування на кожному квадраті (чорно-біла область). Центр шахової марки обчислюється за допомогою виявлення краю. Чим краще буде виявлено лінію між чорним та білим, тим більша ймовірність, що обчислений центр опиниться у реальному центрі.

Виявлення сфер за допомогою автоматичного розпізнавання працює дуже добре на віддалі 7,5 м., практично для всіх вибраних розрізнень. Лише для розрізнення $\frac{1}{32}$ результати сканування з віддалі 7,5 м містять занадто мало точок для визначення центру цілі. На віддалі 35 м малу ціль можна легко виявити з розрізненням $\frac{1}{2}$.

Окрім автоматичного виявлення контрольних цілей можливе напівавтоматичне чи ручне, однак і для цих режимів є обмеження. Тому для вибору кутового кроку сканування пропонується орієнтуватись на рекомендації виробників наземних лазерних сканерів і враховувати віддаленість контрольних марок чи сфер для реєстрації даних НЛС, їх розмір та якість сканування. Наприклад, у (Testing of laser scanning checkerboard targets) подано результати досліджень і реєстрації сканів за допомогою контрольних сфер різних розмірів,

що розташовані на різних віддальях з різним розрізненням і якістю сканування та надано відповідні рекомендації.

Тому, враховуючи вище викладене, оптимальними рішенням за складеним технічним проєктом буде вибір кутового кроку залежно від віддалі між сканером та контрольними цілями та часу сканування. Наприклад, для сканера Faro Focus 3D S120 з максимальною віддалюю 25 м оптимальним буде вибір розрізнення $\frac{1}{4}$, тобто крок сканування 0,036 рад. або ж $\frac{1}{5}$ з кроком сканування 0,045 рад. Час сканування та якість будуть різними.

На крок сканування також впливає розбіжність променя лазерного сканера. Розмір плями променя, що падає на об'єкт є функцією від діаметра початкового променя під час виходу з лазера, розбіжності променя і віддалі сканування. Кінцеві значення діаметра лазерного променя сканера Faro Focus 3D S120 для віддалі сканування – 100 м подано у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2

Розрахунок розбіжності променя лазерного сканера

Розбіжність променя, мрад	Віддаль сканування, м	Діаметр променя на виході, мм	Кінцевий діаметр променя, мм
0,16	10	3,8	5,4
	20		7
	30		8,6
	40		10,2
	50		11,8
	60		13,4
	70		15
	80		16,6
	90		18,2
	100		19,8

Як свідчать результати досліджень наведені у пункті 2.3 «Дослідження точності побудови хмари точок методом наземного лазерного сканування» на щільність хмари точок впливають властивості об'єкта сканування (відбивна здатність поверхні, колір та ін.). Оскільки, об'єктом досліджень є льодовики, поверхня яких містить сніговий покрив (свіжий, старий), фірн, лід і так званий

«брудний лід», альbedo яких змінюється в діапазоні від 90%-20%, вибір розрізнення варто здійснювати з врахуванням найгірших умов.

Якість сканування дозволяє збалансувати рівень шумів в даних сканування та час сканування при постійному значенні розрізнення.

Діапазон сканування дозволяє обмежити область сканування по вертикалі та горизонталі в градусах. Цей параметр доцільно застосовувати, коли необхідно зменшити час сканування без втрати якості.

Додатковими параметрами налаштування наземного лазерного сканера є застосування динамічних фільтрацій (наприклад, контурів та неба) та датчиків температури, нівеліра, компаса та альтиметра.

Розрахунок часу сканування залежно від параметрів розрізнення та якості наведено в (User Manual for the Focus3D 20/120 and S 20/120). Проте, безпосередньо в умовах регіону дослідження, кінцевий час сканування може дещо відрізнятись. Це варто враховувати або ж коригувати деякі параметри сканування таким чином щоб завершити сканування з усіх станцій, що мають перекриття, за один робочий день (з врахування затрат часу на організаційні та транспортні питання, заряд батареї сканера).

Визначення параметрів наземного цифрового знімання. Основними характеристиками цифрової камери є величина фокусної віддалі та розмір кадру. Залежно від віддалі до об'єкта обирають фокусну віддаль, для повного захоплення досліджуваного об'єкта в кадрі. Наприклад, щоб компенсувати втрату точності НЦЗ виходів острівних льодовиків, в умовах вимушеного знімання з великих віддалей (через небезпеку зсуву, провалення чи відколення льоду та омивання берегів островів водоймами) потрібна довгофокусна камера. Для обраної камери визначають елементи внутрішнього орієнтування камери. У пункті 2.1 «Способи визначення елементів внутрішнього орієнтування цифрової неметричної знімальної камери» запропоновано способи визначення фокусної віддалі ЦНЗК, також для визначення ЕВНО рекомендовано способи запропоновані в працях (Глотов & Пашетник, 2013, Глотов & Марусаж 2016, 2019) або ж програмне забезпечення PhotoModeler, Matlab, GML Camera Calibration Toolbox.

Важливим є вибір параметрів налаштування цифрової камери. До них відносять значення діафрагми, часу витримки та значення світлочутливості (ISO).

Сучасні камери оснащені вбудованим вимірювальним апаратом для вимірювання кількості світла, тому можливе автоматичне налаштування для правильно експонованого зображення. Проте, велика кількість снігу та льоду можуть ускладнювати цей процес. В такому випадку автоматичні налаштування призведуть до надто темної експозиції. Щоб уникнути цього, варто зменшити швидкість затвору або збільшити діафрагму. Ще одним способом є налаштування компенсації експозиції. Оскільки автоматичні налаштування призводять до того що сніг виглядає сірим, тому значення компенсації експозиції +1 або +2 дозволить зберегти сніг білим. Перевірку експозиції під час знімання снігового або льодового покриву здійснюють за гистограмою зображення, яка дозволяє отримати інформацію про відображені тони.

Додатковими параметрами налаштування цифрової камери під час знімання снігового або льодового покриву є баланс білого та серійне знімання. Баланс білого встановлюють автоматично або вручну (для снігового або льодового покриву значення близьке 6 500 кельвінів).

Проектування розташування станцій стояння сканера та контрольних марок (сфер). З урахуванням конкретних умов та наявних планів (карт) місцевості проектують кількість та місця розташування станції розташування сканера та спеціальних марок (сфер). Плоскі марки зазвичай використовуються для орієнтування сканів відносно зовнішньої системи координат, сфери – для взаємного орієнтування (реєстрації) сканів.

Вибір станцій стояння сканера повинен забезпечувати максимально ефективну видимість, відсутність «сліпих» зон та відображення на одному скані максимальної площі досліджуваного об'єкта. У зв'язку з цим, сканер необхідно розташовувати на деякій висоті відносно об'єкта сканування (Середович et al., 2009). Таким чином, збільшення висоти сканера дозволяє збільшити огляд області сканування і щільність точок на скані, що значно підвищує інформативність точкової моделі.

В проєктувальних роботах варто враховувати що, як правило, віддаль між станціями стояння сканера обирають в діапазоні 30-60 м, а в деяких випадках і менше, залежно від складності об'єкта. Наприклад, в роботі (Середович et al., 2009) пропонується розташовувати станції на віддалі, що не перевищує величини максимальної віддалі сканування з врахування коефіцієнта 0,636.

Спеціальні марки (сфери) рекомендується розміщувати парами по колу через 90°, на віддалі від сканера, не більшій за 35 м. Така віддаль пов'язана з необхідністю максимально точного визначення координат центрів марок (сфер) у програмному забезпеченні. Для прикладу, максимальна вимірювана віддаль сканера Faro Focus 3D S120 – 120 м. Проте, з різних літературних джерел відомо, що за віддалі між марками (сферами) та сканером, що перевищує 30 м, виконати реєстрацію сканів можна лише за умови максимального розрізнення та якості сканування. З власних досліджень, поданих вище у п.2.3, можна зробити висновок, що оптимальний діапазон сканування для отримання якісних хмар точок контрольних марок та сфер варто обирати в діапазоні близькому до 10 м.

Варто зауважити, що за необхідності описані вище матеріали та засоби включають в матеріально-технічне забезпечення робіт.

Проєктування розташування базисів та опорних точок. Від правильного вибору оптимальних параметрів НЦЗ, до яких відносяться віддалі до ближнього та дальнього планів об'єкта знімання, базис фотографування, фокусна віддаль фотокамери, залежить не тільки точність отриманих результатів, але, і його ефективність та економічність.

Проєктування НЦЗ виконують за допомогою наявного карт-матеріалу або ж цифрових планів/карт досліджуваної території. Перед зніманням визначають кількість станцій та їх розташування, таким чином щоб при мінімальній кількості станцій забезпечити мінімальну кількість «сліпих» зон та потрібну точність [Помилка! Джерело посилання не знайдено.] Виконання багаторазових повторних знімань льодовиків і опрацювання отриманих матеріалів суттєво спрощуються, якщо закріпити базиси постійними жорсткими знаками. За

можливості, станції знімання встановлюються на високому хребті з видом на льодовики.

Проектування розміщення марок опорних точок виконують рівномірно по поверхні об'єкта. З експериментальних робіт встановлено, що кількість опорних точок повинна бути не меншою ніж 6-9 на стереопару.

В якості опорних точок використовують предмети місцевості, що чітко опізнаються на знімках. Як правило, опорні та контрольні точки встановлюють по периферії льодовика, а також на поверхні льоду. Проте, в більшості випадків, особливо зі зміною виконавців та з урахуванням регіону досліджень виникають труднощі в точному опізнанні місць візування. До того ж, розміщення таких точок носить випадковий характер, а їх кількість обмежена. Маркування місцевості – нанесення фарбою чи іншими засобами знаків на місцевості заборонено в антарктичному регіоні. Тому, найдоступнішим і прийнятним є створення марок. Наприклад, нанесення (фарбою, аерозолем, друкування з подальшим ламінуванням та іншими засобами) геометричних знаків на певну поверхню (фанерні щити, металеві або ж гумові пластини). В цьому випадку має значення форма, розмір, симетричність знаку та його контраст з фоном. При створенні марок варто врахувати можливість їх намокання, для збереження можливості точного візування під час подальших польових та камеральних робіт.

Ап'юрірна оцінка точності визначення просторових координат об'єктів НЛС. Похибку вимірів, отриманих за результатами НЛС визначають за формулою (Середович et al., 2009):

$$m_{лз} = \sqrt{m_{нв}^2 + m_{мн}^2} \quad (3.1)$$

де $m_{нв}$ – похибка поодинокого виміру, $m_{мн}$ – похибка моделювання поверхні.

Похибка визначення планових координат і висот точок ЦМР, створеної методом лазерного сканування визначається формулою:

$$m_{лз} = \sqrt{m_{осн.пвп}^2 + m_{роб.пвп}^2 + m_{ор.}^2 + m_{вим.}^2} \quad (3.2)$$

де: $m_{осн.пвп}$ і $m_{роб.пвп}$ – похибки створення основного і робочого планово-висотного положення сканування; $m_{ор.}$ – похибка зовнішнього орієнтування сканів; $m_{вим.}$ – похибка вимірів.

Апріорна оцінка точності визначення координат об'єктів НЦЗ.

Важливим процесом є виконання попередніх розрахунків визначення точності координат точок досліджуваного об'єкта. Формули апріорної оцінки точності дають можливість визначити не тільки точність просторових координат, але і зробити аналіз величин, які впливають на їх точність.

Для визначення апріорної оцінки точності при нормальному випадку знімання ($\alpha = \omega = \kappa \leq 3^\circ - 5^\circ$) пропонується застосування формул (Kurczyński, 2006).

Аналізуючи формулу (3.2) апріорної оцінки точності наземного лазерного сканування та наземного цифрового знімання (Kurczyński, 2006), можна зробити висновок, що точність лазерного сканування на порядок вища ніж цифрового знімання. Тому, для подальших обчислень будемо враховувати гіршу точність – результати цифрового знімання.

3.2 Польові роботи наземного лазерного сканування та наземного цифрового знімання

Польові роботи наземного лазерного сканування містять наступні процеси:

- рекогностування досліджуваної території;
- розташування станцій стояння сканера та контрольних марок (сфер);
- вимірювання координат станцій стояння сканера та контрольних марок (сфер);
- наземне лазерне сканування.

Процес рекогностування місцевості практично зводиться до перевірки запроєктованої схеми розташування станцій стояння сканера та контрольних марок (сфер) з урахуванням конкретних умов місцевості та за необхідності

коригування робочого проєкту знімання. Розташування контрольних марок (сфер) здійснюють згідно рекомендацій у п.3.1 з врахуванням віддалі до об'єкта сканування та максимальної вимірювальної віддалі приладу. Складають абрис досліджуваної території.

Польові роботи наземного цифрового знімання включають наступні процеси:

- рекогностування досліджуваної території;
- закріплення базисних та опорних точок;
- вимірювання координат базисів та опорних точок;
- наземне цифрове знімання.

Рекогностування досліджуваної території виконують згідно аналогічного пункту в процесі польових робіт для НЛС та за необхідності коригують запроєктовану схему розташування базисів та опорних точок. Як зазначено вище, закріплення базисних точок дозволяє спростити процес повторних знімань і опрацювання матеріалів. Для примусового встановлення приладів в одне і теж положення встановлюють довгострокові центри знімання (наприклад, металеві стовпи, висотою 1-1,5 м) з підставкою для встановлення приладів.

Завершальним процесом є складання абрисів досліджуваної території.

Вимірювання координат станцій стояння сканера та контрольних марок (сфер). З урахуванням конкретних умов місцевості вибирають раціональний спосіб для планово-висотної прив'язки станцій стояння сканера та контрольних марок (сфер) до єдиної системи координат. Практичним є застосування супутникових технологій. З урахуванням того, що станції стояння сканера розташовані на стабільних ділянках льодовиків, раціональним є вибір ГНСС-спостережень.

Вимірювання координат базисів та опорних точок. Для планово-висотної прив'язки до єдиної системи координат застосовують ті ж методи, що й для аналогічного пункту в процесі польових робіт НЛС. Проте, часто умови місцевості дозволяють визначити таким методом лише координати базисів. Оскільки, опорні точки розміщують безпосередньо на льодовику, практично

неможливим є навіть RTK-режим супутникових спостережень. В таких випадках координати опорних точок визначають з застосуванням геодезичних побудов (прямої або оберненої засічки електронним тахеометром).

Наземне лазерне сканування. Перед виконанням НЛС перевіряють параметри налаштування наземного лазерного сканера (див. п.3.1). Сканер встановлюють на штатив, центрують та горизонтують за допомогою датчиків. Виконують сканування місцевості та контрольних марок (сфер) навколо точки стояння сканера або ж обмежуються певними горизонтальним та вертикальним діапазоном. Якщо сканер забезпечений цифровою камерою, то виконується також цифрове знімання. Важливим процесом на цьому етапі є ідентифікація марок (сфер) та складання абрису з метою подальшого швидкого визначення їх положення на скані. Також, за допомогою функції попереднього перегляду контролюють якість отриманої хмари точок. Далі, переміщують сканер на наступну станцію сканування і повторюють всі процеси, контролюючи наявність мінімум трьох (одних і тих же) марок (сфер) на сусідніх сканах.

Наземне цифрове знімання. Перед початком знімальних робіт перевіряють параметри налаштування цифрової камери з урахуванням погодних умов місцевості (див. п.3.1). Знімання варто виконувати з різними фокусними віддалями камери, для захоплення об'єкту з різних ракурсів.

3.3 Камеральне опрацювання матеріалів наземного лазерного сканування та наземного цифрового знімання

Визначення координат станцій стояння сканера, контрольних марок (сфер), базисних та опорних точок. Результати вимірів експортують у відповідне програмне забезпечення та за виміряними значеннями віддалей, горизонтальних та вертикальних кутів обчислюють координати станцій стояння сканера, контрольних марок (сфер), базисних та опорних точок в системі координат WGS84 в проєкції Universal Transverse Mercator (UTM).

Реєстрація сканів. Визначення координат точок під час сканування здійснюють в умовній системі координат, як правило її центр співпадає з центром сканера. Тому хмари точок (скани), отримані з різних станцій сканування будуть визначені в різних системах координат. Для об'єднання сканів та приведення їх до однієї системи координат під час сканування на об'єкті необхідно встановлювати спеціальні контрольні марки (сфери), таким чином, щоб для з кожної станції сканування було забезпечено видимість на мінімум 3 спільні контрольні марки.

У процесі реєстрації обчислюються оптимальні положення кожного скана за допомогою трансформації масивів точок.

Реєстрація сканів може бути виконана за допомогою:

- 1) спеціальних світловідбивних марок;
- 2) просторових точок, розпізнаних на різних сканах;
- 3) координат відомих пунктів або контрольних марок.

Фільтрація та редагування сканів. Одним з основних процесів в попередньому опрацюванні сканів є фільтрація точок. Фільтрація необхідна для виключення з хмари точок помилкових вимірів, які спотворюють реальний стан відсканованого об'єкта. Наприклад, у ПЗ Faro Scene реалізовано кілька типів фільтрів, які, залежно від обраних налаштувань, видаляють найсумнівніші виміри та шум. Фільтр «Distance based» використовують для видалення точок сканування за межами певного діапазону

Поверхні з низьким значенням коефіцієнта відбиття можуть бути джерелом шумів, а точки їх поверхні містити неправильні координати. Тому, рекомендується видаляти точки з низьким значенням відбиття. Для такої фільтрації хмари точок використовують фільтр «Reflectance Threshold», для налаштувань якого вводять мінімальне значення коефіцієнта відбиття точок, що залишаться на скані. Цей фільтр не використовується після присвоєння точкам скана реальних кольорів. Фільтр «Dark Scan Points» застосовують для видалення зайвого шуму. Фільтр згладжування «Smooth» або «Edge artifact filter» змінює положення точок залежно від сусідніх вимірів. Для застосування цього фільтра необхідно ввести кількість сусідніх точок, за якими перераховуватиметься

положення поточної точки, а також максимальну віддаль до сусідньої точки, яка приймає участі у процесі згладжування.

Створення точкових моделей. Останнім етапом є безпосереднє створення точкових моделей. Після фільтрації сумнівних вимірів та шумів, з хмари точок видаляють точки, які не належать поверхні льодовика.

Алгоритм виявлення «мертвих» зон НЛС. У зв'язку зі складністю рельєфу, відбиваючою поверхнею та іншими чинниками, дані наземного лазерного сканування, в більшості випадків, міститимуть «мертві» зони. Для отримання даних про поверхню льодовика в цих зонах, згідно методики комплексного дослідження виконують наземне цифрове знімання. Для виявлення «мертвих» зон та визначення ділянок, що підлягають НЦЗ запропоновано алгоритм, що складається з наступних процесів:

- 1) задання поверхні льодовика у вигляді точкової моделі;
- 2) побудова TIN поверхні з застосуванням триангуляції Делоне;
- 3) пошук «мертвих» зон за довжиною ребер трикутників;
- 4) відображення результатів пошуку.

Технологічну схему процесу подано на рис. 3.2:

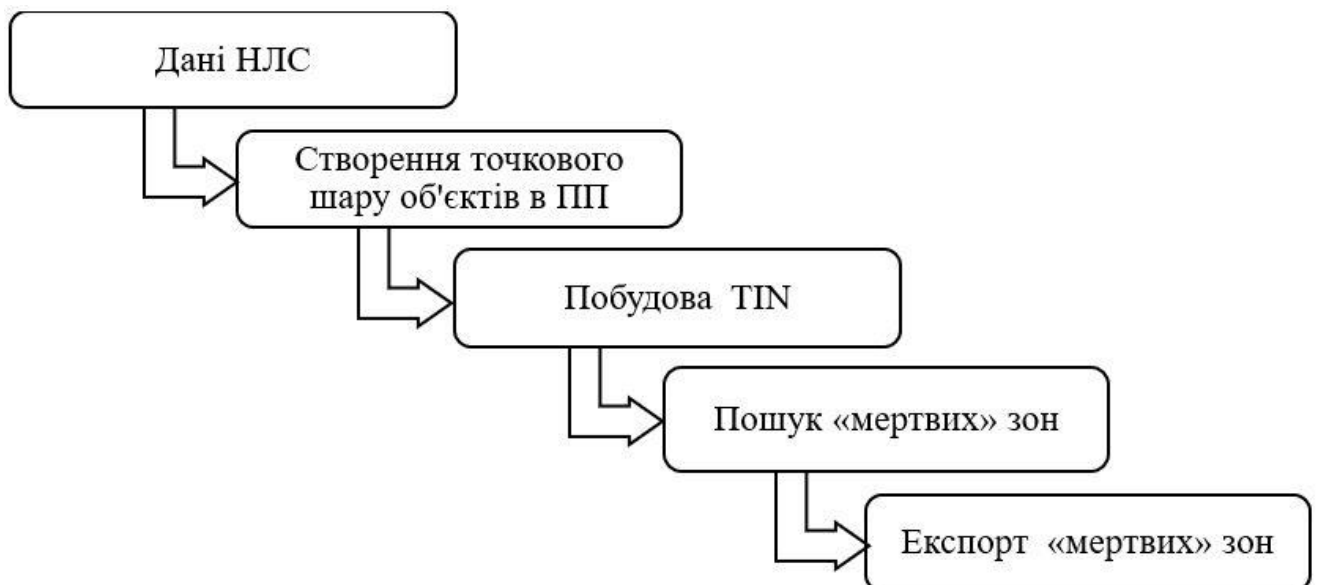


Рис. 3.2 Технологічна схема алгоритму виявлення «мертвих» зон НЛС

Усунення дисторсії на знімках. Врахування дисторсійних спотворень на знімках виконують відповідно до п. 2.2 «Дослідження дисторсійних спотворень ЦНЗК».

Орієнтування знімків. Камеральне опрацювання матеріалів знімання виконують на цифрових фотограмметричних станціях. Програмні засоби повинні забезпечувати максимальну автоматизацію процесів орієнтування знімків, побудови фотограмметричної моделі та отримання цифрової інформації про місцевість.

Побудова ЦМР для «мертвих» зон. Для аналізу поверхонь льодовиків та їх кількісних параметрів використовують цифрові моделі рельєфу (Karabork et al., 2004). Одним з основних параметрів при побудові ЦМР є вибір методу її задання. Наприклад, в роботі (Бурштинська, Тумська & Лелюх, 2000) для отримання вхідної інформації про рельєф застосовували спосіб відслідковування або сканування горизонталей з доповненням точковою інформацією. Оптимізацію вибору інтервалу здійснювали на основі кореляційно-спектрального аналізу рельєфу.

Застосування картометричних даних для побудови цифрової моделі рельєфу також подано у роботах (Рудий & Кравець, 2019, Rudyi, Kyselov, Domashenko, Kravets & Nusar, 2020). Створена тривимірна модель рельєфу частини Чорногірського хребта дозволила дослідити потенційно лавинонебезпечні території.

Гібридний алгоритм опрацювання рельєфу для створення ЦМР запропоновано компанією INPHO (Німеччина) (Рассказова & Бобылев, 2010). Розробники INPHO переконані, що найкращу точність побудови моделі рельєфу для екологічних цілей забезпечить гібридна модель, подана у вигляді регулярної сітки, накладеної на структурні лінії рельєфу. Проте, в роботі не розглядають вибір інтервалу регулярної сітки ні залежно від характеру рельєфу, ні вимог до точності ЦМР.

Проаналізувавши літературні джерела (Cahyono, Matori, Atunggal, Basith & No, 2009, Cahyono, Matori, Basith & Atunggal, 2009) залежно від методу отримання

даних про рельєф об'єкта, можна виділити різні форми задання цифрової моделі рельєфу: з регулярним розміщенням точок на квадратних, прямокутних та інших сітках (Dai & Hollyer, 2004); з нерегулярним поданням точок по структурних лініях (Карпінський & Лященко, 2000), профілях (Sanjosé & Lerma, 2004), центрах площ, локальних точках (Jiang, E, Zhan & Liu, 2009); з ізолінійним заданням точок (Chandler, Ashmore, Paola, Gooch & Varkaris, 2002); застосування методів інтерполяції (Бурак, Ковтун, Левицький & Ничвид, 2014, Бурак, Ковтун & Левицький, 2015). Варто підкреслити, що в більшості досліджень, де використовували регулярну сітку для побудови ЦМР, інтервал був встановлений експериментальним шляхом або не обґрунтований в працях. Тому, можна зробити висновок, що досі остаточно не розроблено методики розрахунку оптимального інтервалу сітки для побудови цифрової моделі для визначення об'ємів льодовиків.

Оскільки, реалізація стереофотограмметричного методу (Книжников & Федоренко, 1977) полягає в побудові ЦМР поверхні виходів льодовиків, запропоновано алгоритм оптимізації вибору інтервалу сітки для побудови цифрової моделі рельєфу для визначення змін поверхневих об'ємів льодовиків.

Алгоритм оптимізації інтервалу ЦМР. Цифрову модель рельєфу запропоновано задавати регулярним розміщенням точок у вузлах сітки з квадратною елементарною коміркою.

На розміри інтервалу сітки, в першу чергу впливають такі величини: похибки визначення координат точок, довжин ліній, а також похибка визначення глибини, площі та об'єму об'єкта (Sokol, Liptak & Vajtala, 2014).

Оскільки, існують відповідні вимоги до точності отримання значень об'ємів (Катушков et al., 1994, Strategy, 2007), то для визначення параметрів сітки вважатимемо відносну похибку об'єму відомою як значення похибки функції, а відносні похибки геометричних параметрів льодовика шуканими аргументами. Це являє собою обернену задачу теорії похибок, коли потрібно визначити граничні відносні похибки аргументів так, щоб відносна похибка функції не перевищувала заданої величини (Зазуляк, Гавриш, Євсєєва & Йосипчук, 2007).

Розглянемо послідовно етапи алгоритму (Глотов & Марусаж, 2015).

Перший етап роботи передбачає обчислення апріорної оцінки точності визначення координат точок. Цей етап є обов'язковим, оскільки середньоквадратичні похибки визначення фотограмметричних координат точок впливають на всі наступні виміри та процеси. Обчислення СКП визначення фотограмметричних координат точок пропонується виконувати за формулами (Kurczyński, 2006).

Другим етапом є задання точності визначення об'єму льодовиків. Об'єм об'єкта визначають за формулою:

$$V = S\Delta Y \quad (3.3)$$

де, ΔY – глибина льодовика.

Для оцінки точності визначення об'ємів диференціюємо формулу (3.3) за обома змінними і, поділивши обидві частини рівняння на V знайдемо:

$$\frac{dV}{V} = \frac{dS}{S} + \frac{d\Delta Y}{\Delta Y} \quad (3.4)$$

Перейдемо до СКП і отримаємо відносну похибку визначення об'єму льодовика:

$$\frac{mV}{V} = \frac{m_S}{S} + \frac{m_{\Delta Y}}{\Delta Y} \quad (3.5)$$

Відносна похибка визначення об'єму за такими розрахунками дорівнюватиме 1-2% (Катушков et al., 1994), що є достатнім для гляціологічних вимог (Paul, 2017). 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. Знайдемо граничне значення глибини в межах елементарної комірки сітки (Глотов & Смолій, 2009):

$$2\Delta Y_{гран.} = 2 \frac{fM}{r} \delta_{\Delta Y_{гран.}} \quad (3.6)$$

де, f – фокусна віддаль цифрової камери; M – знаменник масштабу плану, який вибирається відповідно до середньоквадратичних похибок визначення координат об'єкта; r – півдіагональ робочої зони знімку; $\delta_{\Delta Y_{\text{гран.}}}$ – граничне зміщення точки за рельєф на знімку (величина зміщення приймається рівною 0,2 мм).

З формули (3.6) знайдемо $\Delta Y_{\text{гран.}}$ в межах елементарної комірки сітки.

Для визначення граничної відносної похибки визначення глибини об'єкта приймемо, що:

$$\frac{m_{\Delta Y}}{\Delta Y} = \frac{\delta_{\Delta Y_{\text{гран.}}}}{\Delta Y_{\text{гран.}}} \quad (3.7)$$

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 за формулою (3.5).

Для подальших розрахунків приймемо, що гранична відносна похибка визначення площі всього об'єкта дорівнює граничній відносній похибці визначення площі елементарної комірки сітки:

$$\frac{m_S}{S} = \frac{m_s}{s} \quad (3.8)$$

П'ятим етапом є безпосереднє обчислення оптимального інтервалу сітки. Площа елементарної комірки:

$$s = a^2 \quad (3.9)$$

де, a – довжина сторони комірки.

Продиференціюємо (3.9) та перейдемо до СКП:

$$m_s = 2am_a \quad (3.10)$$

З формули (3.8) знайдемо відносну похибку визначення площі елементарної комірки та прирівнявши (3.9) та (3.10) знайдемо довжину сторони елементарної комірки сітки:

$$a = \frac{2m_a}{\frac{m_s}{s}} \quad (3.11)$$

де,

$$m_a = \sqrt{2}m_x \quad (3.12)$$

Отримана формула (3.11) 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 $\Delta Y_{\text{гран.}}$, то розраховують кількість зон (Глотов & Смолій, 2009), в межах яких ΔY є допустимим:

$$n = \frac{\Delta Y}{2\Delta Y_{\text{гран.}}} \quad (3.13)$$

де,

$$\Delta Y = \Delta Y_{\text{max}} - \Delta Y_{\text{min}} \quad (3.14)$$

де, Y_{min} і Y_{max} – мінімальні та максимальні координати точок значень глибини об'єкта.

Тоді інтервал сітки створюваної ЦМР знайдемо за формулою:

$$a_{\text{зони}} = \frac{a}{n} \quad (3.15)$$

Визначивши інтервал сітки, знайдемо кількість вузлів сітки, в яких виконуватимуться виміри:

$$k = k_x k_z \quad (3.16)$$

де,

$$k_x = \frac{L_x}{a} + 1 \quad (3.17)$$

$$k_z = \frac{L_z}{a} + 1 \quad (3.18)$$

де, k – кількість вузлів, k_x – кількість вузлів по осі X, k_z – кількість вузлів по осі Z, L_x, L_z – довжини сторін об'єкта відповідно по осях X та Z.

3.4 Визначення змін поверхневих об'ємів

Камеральний етап визначення змін поверхневих об'ємів складається з наступних 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 змін поверхневих об'ємів.

Об'єднання точкових моделей НЛС та ЦМР «мертвих» зон за даними НЦЗ. Точкові моделі, отримані за матеріалами наземного лазерного сканування доповнюють цифровими моделями поверхонь льодовиків «мертвих» зон за даними наземного цифрового знімання. Отримані узгоджені точкові моделі експортують у програмне забезпечення з функцією визначення об'ємів.

Побудова TIN моделей. За об'єднаними даними будують TIN модель для подальшого визначення змін об'ємів.

Обчислення об'ємів відносно площини початкового відліку. Для обчислення об'ємів можна використовувати кілька методів. У кожного методу є свої переваги та недоліки залежно від форми предмета. Їх можна розділити на дві групи: лінійні та об'єкти поверхонь. Для лінійних об'єктів поширеним методом є метод прямокутників. Об'єм поверхневого об'єкта можна обчислити за методами трапецій (прямокутної або трикутної призми), класичними (метод трапецій, формула Сімпсона та метод скінченних об'ємів) та вдосконаленими методами (на основі формул Сімпсона, кубічного сплайна та кубічної формули Ерміта) (Yanalak, 2005).

За допомогою методу трапецій можна обчислити об'єм двома способами: трикутної та прямокутної призми. Для визначення змін об'ємів пропонується метод прямокутної призми. Такий вибір пояснюється тим, що дозволяє обчислювати об'єм об'єкта відносно деякої площини (надалі вживатимемо

площиною початкового відліку). Площину обирають після завантаження 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).

Цей метод реалізовано в багатьох програмних забезпеченнях з функцією обчислення об'ємів. Зміну об'єму виходу льодовика обчислюють як сумарну кількість об'ємів окремих призм за методом прямокутної призми (Yanalak, 2005):

$$V = F * (y_m - y_0) \quad (3.19)$$

де,

$$y_m = \frac{\sum_{i=1}^n (g_i * y_i)}{4 * n} \quad (3.20)$$

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 всіх чотирикутників;

y_0 – глибина площини початкового відліку.

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

3.5 Висновки до розділу 3

Запропоновано комплексне застосування методів наземного лазерного сканування та цифрового стереофотограмметричного знімання для отримання даних про поверхню льодовиків. Згідно гляціологічних вимог розроблено методику, що дозволяє визначити зміни поверхневих об'ємів льодовиків з

точністю до 1%. Параметри сканування і побудови ЦМР розраховані з необхідної точності.

Наведено технологічну схему методики комплексного дослідження, в якій враховано деталізацію вибору параметрів і опрацювання даних для визначення об'єму льодовиків. Подано рекомендації до виконання етапів створення технічного проєкту, польових робіт НЛС та НЦЗ, камерального опрацювання їх матеріалів та визначення змін поверхневих об'ємів. Основну увагу надано особливостям проведення вимірювань льодовикових поверхонь та засобам їх опрацювання.

Для виявлення «мертвих» зон та визначення ділянок, що підлягають НЦЗ запропоновано алгоритм, який здійснюють шляхом виключення з TIN поверхні окремих трикутників. Спосіб виключення трикутників базується на триангуляції Делоне та аналізі довжин ребер.

Запропоновано алгоритм оптимізації інтервалу ЦМР та виведено формули для обчислення інтервалу сітки для побудови цифрових моделей поверхонь льодовиків у місцях «мертвих» зон НЛС.

Для визначення поверхневих об'ємів пропонується застосовувати метод прямокутної призми, де зміну об'єму виходу льодовика обчислюють як сумарну кількість об'ємів окремих призм. Зміни поверхневих об'ємів острівних льодовиків обчислюють як різниці об'ємів між циклами спостережень.

РОЗДІЛ 4

АПРОБАЦІЯ МЕТОДИКИ КОМПЛЕКСНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІН ПОВЕРХНЕВИХ ОБ'ЄМІВ ЛЬОДОВИКІВ

З метою аналізу точності методики комплексного дослідження виконано її апробацію з застосуванням методів наземного лазерного сканування та наземного цифрового знімання. Апробацію виконано 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), XXIV (2019 р.) працівниками Інституту геодезії Національного університету «Львівська політехніка» (Третяк К.Р., Глотов В.М., Голубінка Ю.І., Савчин І.Р., Нікулішин В.І., Шило Є.О., Маліцький А.Ю.).

Виконано наземне лазерне сканування (2013 р., 2014 р., 2018 р.) та цифрове стереофотограмметричне знімання (2013 р., 2014 р., 2018 р., 2019 р.) західного та південного виходів льодовика острова Галіндез та південного виходу льодовика розташованого на острові Вінтер. Сканування виконано наземним лазерним сканером Faro Focus 3D S120, а знімання – цифровими камерами Canon EOS 450D та Canon EOS 6D Canon Mark III D, діапазон фокусних віддалей: 16 мм, 18 мм, 35 мм, 55 мм, випадки знімання: нормальний та відхилений.

4.1 Опрацювання даних наземного лазерного сканування

Для планово-висотної прив'язки станцій стояння сканера та контрольних марок (сфер) до єдиної системи координат виконували ГНСС-спостереження. Для цього застосовували комплект двох двохчастотних ГНСС приймачів Leica GPS1200. Під час проведення ГНСС спостережень один з приймачів встановлювали на геодезичному пункті VER1, поблизу Української Антарктичної станції «Академік Вернадський», другий послідовно встановлювали на контрольних марках та станціях сканування. Також, було використано дані спостережень перманентної станції VNAD, встановленої поблизу станції «Академік Вернадський». Спостереження виконували в кінематичному режимі.

Результати вимірів опрацьовували в програмному пакеті Leica Geo Office і трансформували у систему координат WGS84 в проєкцію UTM зона 20S. Середні квадратичні похибки їх визначення не перевищували 5 см.

Максимальна вимірювана віддаль сканера Faro Focus 3D S120 не перевищує 120 м. Сканер розташовували таким чином, щоб віддалі до об'єкта не перевищували 80 м., а віддалі між контрольними марками та сканером не були більшими за 35 м. Відповідно в налаштуваннях сканера встановлювали розрізнення сканування в межах 1/2-1/4. Тривалість сканування на одній станції складала 30 – 45 хвилин.

Допустимі кути падіння лазерного променя на поверхню льодовика не повинні бути менші 45°. За менших кутів практично відсутнє приймання сканером відбитого сигналу. Відповідно з'являються невідскановані ділянки.

В налаштуваннях параметрів сканування додатково застосовували фільтри (контурів та неба) та датчиків температури, нівеліра, компаса та альтиметра.

Для опрацювання результатів вимірів застосовували програмний пакет Faro Scene та Leica Cyclone Geosystems. Попереднє опрацювання даних виконували у програмному забезпеченні фірми-виробника наземного лазерного сканера – Faro Scene. Опрацювання даних в ПЗ Faro Scene складається з декількох етапів:

- Створення проєкту;
- Імпорт даних наземного лазерного сканування (хмари точок, зображення);
- Фільтрація сканів;
- Реєстрація сканів.

На початковому етапі виконано фільтрацію даних з метою усунення хибних точок, отриманих внаслідок складних погодних умов, кута відбиття об'єкту сканування та ін. У ПЗ Faro Scene реалізовано кілька типів фільтрів, які, залежно від обраних налаштувань, видаляють сумнівні виміри.

Після фільтрації виконували об'єднання сканів льодовиків в єдину точкову модель за допомогою функції автоматичного розпізнавання контрольних сфер з подальшим редагуванням та перевіркою точності побудови моделей сфер. Для прикладу, в 2018 р. мінімальна похибка для льодовика на о. Галіндез складала

0,60 мм, а максимальна – 10,40 мм, а для льодовика на о. Вінтер: мінімальна – 0,55 мм та максимальна – 7,40 мм.

Результатом попереднього опрацювання даних НЛС є точкові моделі льодовиків островів Галіндез та Вінтер (Додаток Б). Слід зазначити, що 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 прикладу наведено точкову модель західної частини льодовика о. Галіндез за 2018 р. (рис. 4.1).

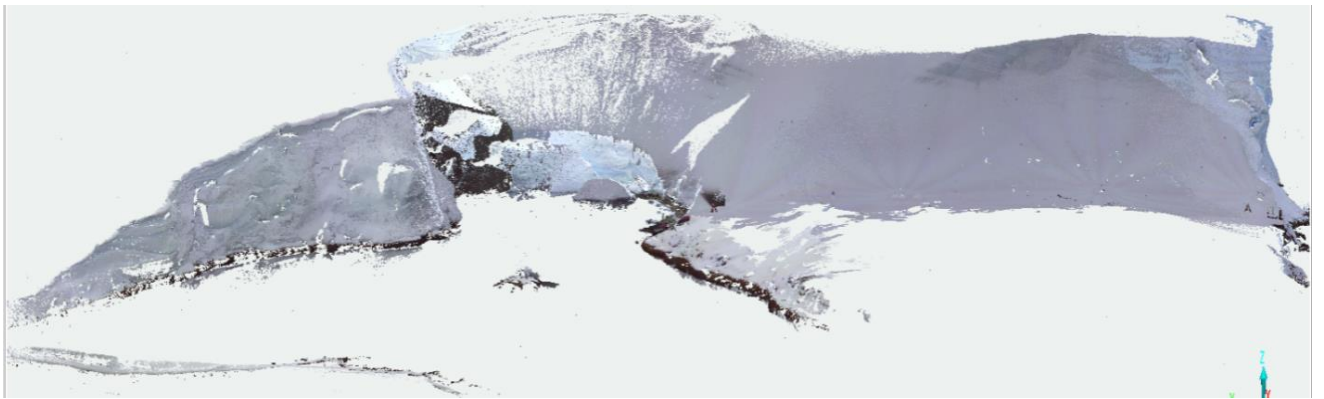


Рис. 4.1 Точкова модель західної частини льодовика о. Галіндез, 2018 р.

Для обчислення змін поверхневих об'ємів льодовиків застосовано ПП Cyclone. Опрацювання даних в ПП Cyclone складається з декількох етапів:

- Завантаження даних сканування в програмне середовище.
- Приведення точкових моделей до системи координат WGS84 та картографічної проєкції UTM за допомогою координат контрольних марок.
- Побудова цифрової моделі рельєфу у вигляді TIN.
- Редагування моделі рельєфу.
- Обчислення поверхневих об'ємів льодовика.

Для приведення точкових моделей до WGS84 проєкції UTM необхідно позначити на точкових моделях контрольні марки. Процес реєстрації марок подано на рис. 4.2:



Рис. 4.2 Процес реєстрування марки: а) позначення марки; б) введення назви позначки; в) результат

Для прикладу, на рис. 4.3 наведено результат реєстрації двох сканів виходу південної частини льодовика на о. Галіндез за 2013 р.

Constraint	Scanworld	Scanworld	Function Value (sq m)	RMS (m)	Avg (m)	Min (m)	Max (m)	Point Count	Status
Cloud/Mesh 1	Mist13017.flc	Mist13019.flc	0.000007	0.01	0.007	0.000	0.100	485700	Aligned

Рис. 4.3 Результати реєстрації

Наступним процесом є розрахунок інтервалу регулярної сітки для побудови ЦМР з метою визначення змін об'ємів виходів льодовиків з точністю 1%.

Для прикладу, подано цифровий знімок західної сторони виходу льодовика на острові Галіндез, отриманий з лівої точки базису знімання (рис. 4.4). Розміри досліджуваних об'єктів наведено у таблиці 4.1.

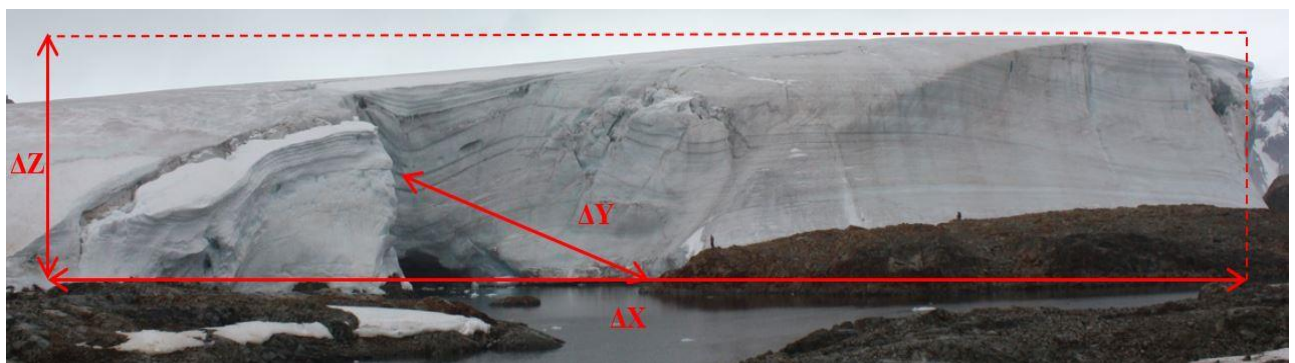


Рис. 4.4 Вихід західної частини льодовика на о. Галіндез та схематичне подання його розмірів

Таблиця 4.1

Розміри льодовиків

Об'єкт	Максимальні габаритні розміри		
	ΔX , м	ΔZ , м	ΔY , 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

Апріорну оцінку точності визначення координат точок обчислювали відповідно до вищевикладеного алгоритму. Результати апріорної точності визначення фотограмметричних координат для нормального випадку знімання, камерою Canon EOS 450D з фокусною віддаллю 18 мм, наведені у таблиці 4.2. Очікувану точність визначення об'ємів обчислено за (Kurczyński, 2006).

Таблиця 4.2

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

Для подальших обчислень приймемо, що допустима відносна похибка визначення об'єму становить 1%. Результати обчислень граничної відносної похибки визначення глибини та площі об'єкта наведено у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Обчислення граничної відносної похибки визначення глибини та площі

Назва об'єкту	M	$r, мм$	$\delta_{\Delta Y_{гран}}, мм$	$\delta \Delta Y_{гран}, м$	$\frac{m_{\Delta Y}}{\Delta Y} \text{ гран}, \%$	$\frac{m_S}{S} \text{ гран}, \%$
Вихід західної частини льодовика на о. Галіндез	2000	12	0,2	0,6	0,03	0,97
Вихід південної частини льодовика на о. Галіндез						
Вихід південної частини льодовика на о. Вінтер						

Результати обчислення інтервалу сітки для побудови ЦМР подано у таблиці 4.4, а щільності вузлів сітки – у таблиці 4.5.

Оптимальний інтервал сітки для побудови ЦМР

Назва об'єкту	$m_a, \text{М}$	$a, \text{м}$	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

Розрахунок щільності вузлів сітки

Назва об'єкту	Площа, м^2	$L_x,$ м	$L_z,$ м	n_x	n_z	n	δ , щільність вузлів сітки
Вихід західної частини льодовика на о. Галіндез	5600	160	35	122	27	3355	0,6
Вихід південної частини льодовика на о. Галіндез	7000	175	40	147	34	5044	0,7
Вихід південної частини льодовика на о. Вінтер	3100	155	20	95	13	1238	0,4

За розрахованими інтервалами регулярної сітки виконували побудови ЦМР поверхонь виходів льодовиків.

Алгоритм виявлення «мертвих» зон НЛС. Для виявлення «мертвих» зон наземного лазерного сканування та визначення ділянок, що підлягають наземному цифровому зніманню реалізовано відповідний алгоритм (див. п.3.3). Реалізацію алгоритму здійснено в ПП ArcGis за допомогою моделі геообробки. Для виконання кожного з процесів алгоритму застосовано відповідні інструменти з ArcToolbox.

Згідно моделі геообробки першим кроком є завантаження даних НЛС у вигляді текстового файлу, що містить координати точок. Для ідентифікації даних з текстового файлу застосовують інструмент Make XY Event Layer. Для кожної з координат вказують номер стовпців з їх розташуванням (X, Y, Z Field) та просторову прив'язку даних (Spatial Reference). Результатом першого кроку є точкова модель за даними НЛС (DEM).



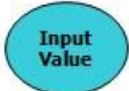

Згідно другого процесу алгоритму виконують побудову TIN інструментом Create TIN з застосуванням тріангуляції Делоне – Constained Delounau, отримують TIN поверхню.

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 в подальшому завантажують в ППІ Digitals. Для цього застосовують інструмент TIN Domain, а результатом є файл NoData. Модель геообробки алгоритму виявлення «мертвих» зон подана (рис. 4.5). Опис елементів моделі геообробки подано у таблиці 4.6.

Таблиця 4.6

Опис елементів моделі геообробки

Елемент	Опис
	Змінна даних – існуючі дані, додані в модель. Назва файлу даних відповідає вхідним параметрам інструмента (TLS_Data).
	Похідна або вихідна змінна даних – нові дані, створені інструментом в моделі. Такими змінними в моделі геообробки для реалізації алгоритму є DEM, TIN та результат – NoData.
	Змінна значення – вхідні значення (параметри) інструмента. Параметрами інструмента Make XY Event Layer є X, Y, Z Field, Spatial Reference; інструмента Create TIN – Constained Delounau; інструмента Delineate TIN Data Area – Maximum Edge та Method; інструмента TIN Domain – Output feature.
	Вбудований інструмент – системний інструмент, доступний в ArcToolbox. В моделі геообробки застосовано інструменти Make XY Event Layer, Create TIN, Delineate TIN Data Area та TIN Domain

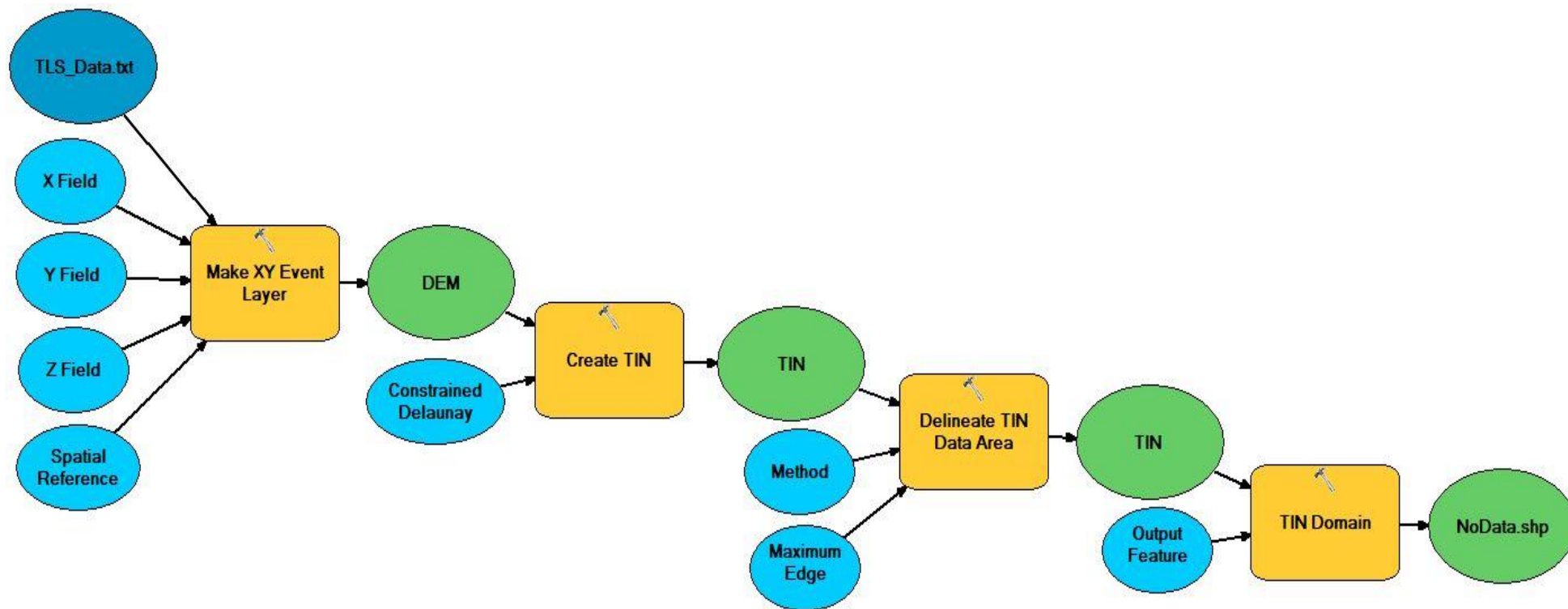


Рис. 4.5 Модель геообробки для реалізації алгоритму виявлення «мертвих» зон НЛС

В результаті реалізації алгоритму в місцях «мертвих» зон НЛС отримують полігон з вирізаним фрагментами (рис. 4.6), де віддаль між точками не перевищує розрахованого інтервалу сітки для побудови ЦМР.



Рис. 4.6 Результат реалізації алгоритму виявлення «мертвих» зон НЛС

На рис. 4.7 показано результат перевірки виконання умов алгоритму.

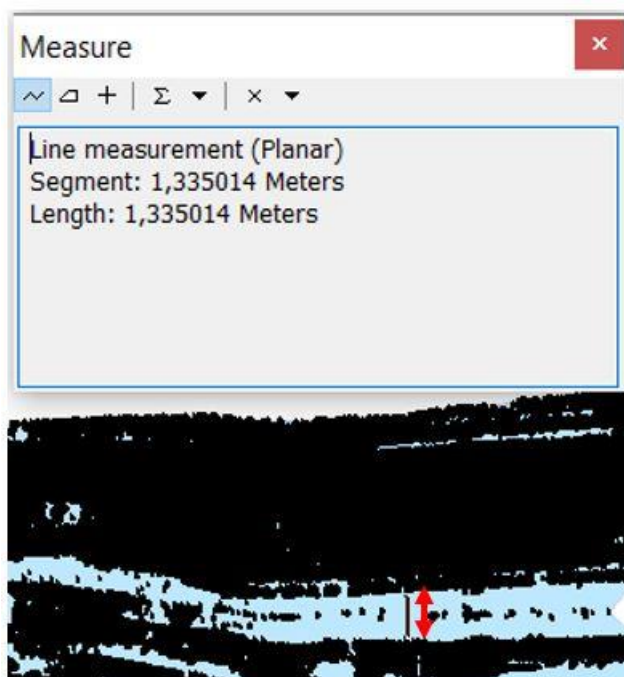


Рис. 4.7 Результат перевірки виконання умов алгоритму

Як видно з рисунка віддаль між даними НЛС не перевищує необхідної величини (таблиця 4.4).

Отримані полігони слугують маскам для побудови цифрових моделей поверхонь льодовиків за даними наземного цифрового знімання.

4.2 Опрацювання матеріалів наземного цифрового знімання

Під час попередніх (2002-2005) Українських антарктичних експедицій працівниками НУ «Львівська політехніка» Інституту геодезії встановлено довгострокові центри знімання (рис. 4.8). Для їх встановлення використовували товстостінні труби діаметром 7 см та 160 см завдовжки. Для встановлення приладів з торцевої частини труби шляхом зварювання закріплювали підставка розміром 15x15 см, в якій зроблено отвір діаметром 16 мм для примусового центрування. З метою посилення жорсткості, підставка додатково закріплено скісною підпіркою.

Довгострокові центри знімання закріплені на місцевості, на наявних карт-матеріалах відзначено їх розташування і запроєктовано місця розташування опорних точок з наближено рівномірним розташування на поверхні виходів льодовиків. Для будь-якого сезону спостережень та кожного з виходів льодовика кількість опорних точок становила від 10 до 30. Знімки досліджуваних частин льодовика на о. Галіндез та о. Вінтер за 2003-2019 роки подані у Додатку В.

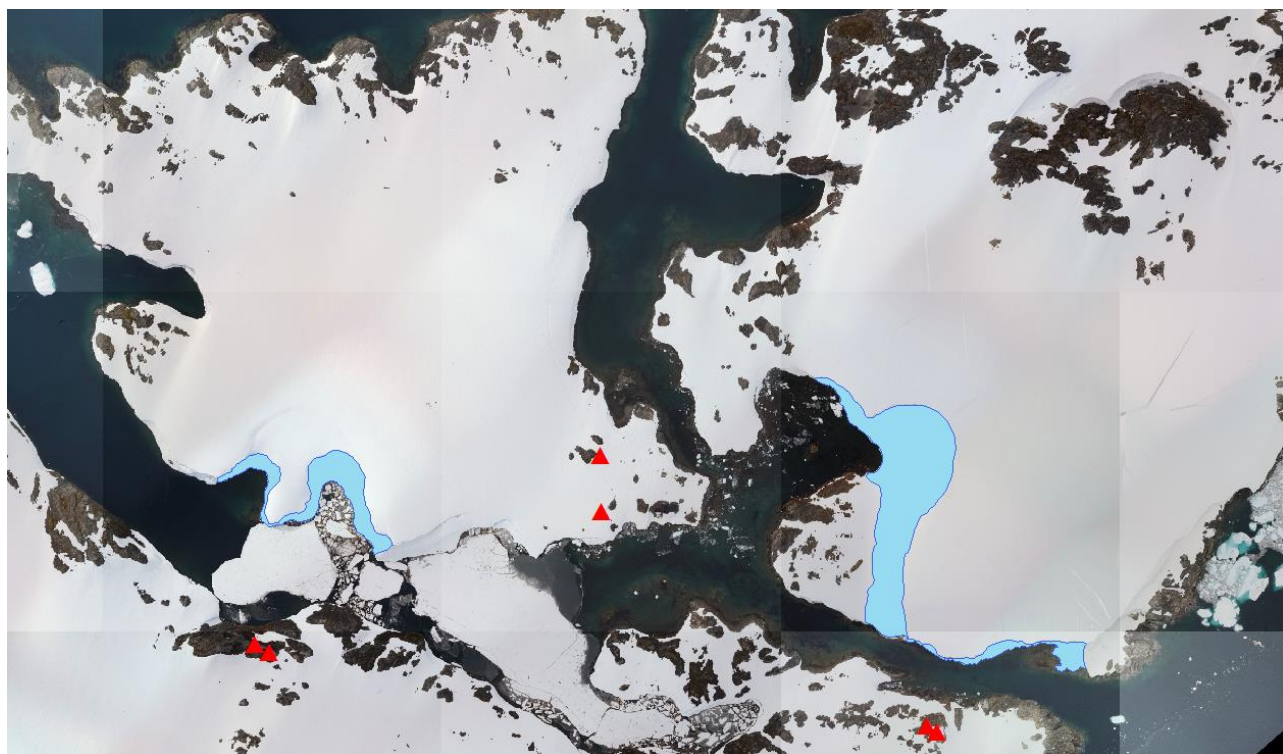


Рис. 4.8 Розташування базисів (▲) та виходів льодовиків на островах Галіндез та Вінтер (■ – досліджувана поверхня)

В якості опорних точок обирали характерні форми рельєфу поверхні льодовиків та плоскі марки. Координати базисних точок визначали методом ГНСС-спостережень, а опорних – тахеометричною зйомкою. Для цього застосовували комплект двох двохчастотних ГНСС приймачів Leica GPS120 та електронний тахеометр Leica TCR405 Ultra.

Перед початком знімальних робіт встановлено параметри налаштування цифрової камери з урахуванням погодних умов місцевості. В більшості випадків, значення параметрів були близькими до наступних: значення діафрагми $\sim 1/14$, часу витримки $\sim 1/125$ с та значення ISO ~ 100 .

З кожної точки базису отримано три стереопари: одну – при перпендикулярному положенні оптичної осі камери до базису, а дві інші – при рівномірному відхиленні цієї осі вліво та вправо.

Для врахування дисторсійних спотворень на знімках використано програмне забезпечення GML Camera Calibration Toolbox.

Камеральне опрацювання отриманих матеріалів НЦЗ виконано на цифровій фотограмметричній станції (ЦФС) „Дельта-2” за допомогою програмного забезпечення Digital. Процес опрацювання матеріалів наземного стереофотограмметричного знімання складається з підготовчих робіт, попереднього опрацювання вхідних даних, орієнтування знімків та безпосередньої побудови ЦМР.

На етапі підготовчих робіт проаналізовано матеріали НЦЗ, виконано апріорну оцінку точності отримання координат точок місцевості та попереднє опрацювання матеріалів НЦЗ, яке включає в себе такі процеси, як: підготовка та введення параметрів знімання, створення каталогу координат опорних точок, внесення координат центрів проєкцій знімків та побудову пірамід зображень. Вказавши всі необхідні параметри, виконують взаємне й зовнішнє орієнтування.

Отримані знімки після усунення дисторсійних спотворень орієнтують за допомогою додатку Models.exe в режимі «Наземне знімання» та «Два поодиноких знімка».

Перед побудовою ЦМР у ПЗ DigitalS побудовано сітку за розрахованим інтервалом (таблиця 4.4) відповідно для кожного з виходів льодовиків.

Отримані полігони, з алгоритму виявлення «мертвих» зон НЛС, завантажено в ПЗ DigitalS. Вони слугують маскам для побудови цифрових моделей поверхонь льодовиків за даними наземного цифрового знімання. Відповідно, у перехрестях отриманої сітки виконано виміри в стерео режимі для побудови цифрових моделей поверхонь льодовиків. Для прикладу на рис. 4.9 наведено цифрова модель поверхні для всього виходу західної частини льодовика на острові Галіндез 2013 року.

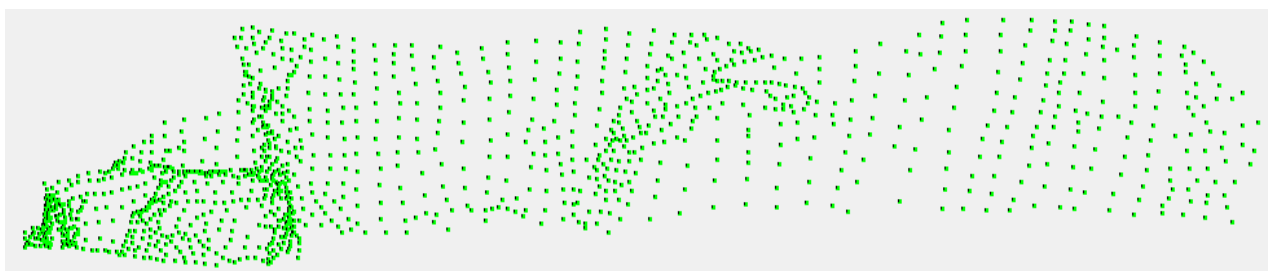
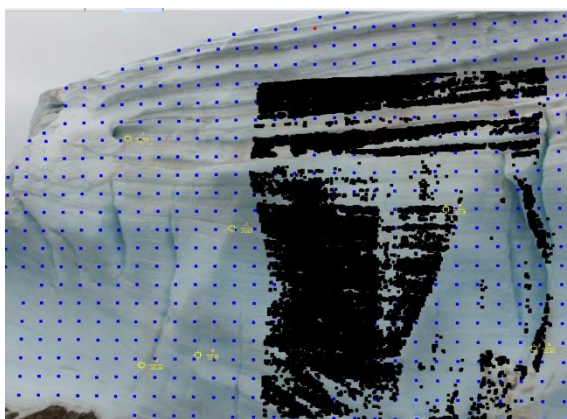


Рис. 4.9 Цифрова модель поверхні виходу західної частини льодовика на о. Галіндез (2013 р.)

В подальшому ЦМР будували тільки в зонах, де немає даних НЛС. Результат реалізації алгоритму виявлення «мертвих» зон НЛС для виходу південної частини льодовика на о. Галіндез (2013 р.) подано на рис. 4.10. Наведено «мертві» зони (рис. 4.10 а) з доповненою цифровою моделлю рельєфу за даними НЦЗ (рис. 4.10 б).

Для перевірки точності ЦМР, отриманої за матеріалами НЦЗ, виконано порівняння координати Y (глибини) точок поверхні льодовика за даними обох методів. Обчислення виконано за 50 точками фрагмента поверхні виходу південної частини льодовика на о. Галіндез (рис. 4.10 в).





в)

Рис. 4.10 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); в) збільшений фрагмент ЦМР за даними НЛС та НЦЗ

СКП становить 16,1 см, що не перевищує розрахункової точності.

4.3 Визначення змін поверхневих об'ємів

Визначення змін поверхневих об'ємів льодовиків складається з наступних 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 змін поверхневих об'ємів.

Об'єднання точкових моделей НЛС та НЦЗ. Для інтеграції матеріалів відповідні цифрові моделі рельєфу поверхонь виходів льодовиків за даними НЦЗ експортовано у програмне забезпечення Leica Cyclone і об'єднано з матеріалами НЛС.

Побудова TIN моделей. За об'єднаними даними побудовано TIN модель для подальшого визначення об'ємів. Отримані TIN моделі візуально перевірено та за необхідності виконано редагування моделі.

Обчислення об'ємів відносно площини початкового відліку. Як зазначалось вище, програмне забезпечення Cyclone для визначення змін об'ємів

використовує метод прямокутної призми. Тому, для обчислення змін поверхневих об'ємів побудовано строго вертикальну площину початкового відліку, яка є сталою для всіх циклів спостережень.

Обчислення поверхневих об'ємів льодовика. Розрахунок об'єму льодовикових мас здійснюється від площини початкового відліку. На рис. 4.11 подано результат обчислення поверхневого об'єму льодовика південної частини льодовика на о. Вінтер у 2013р:

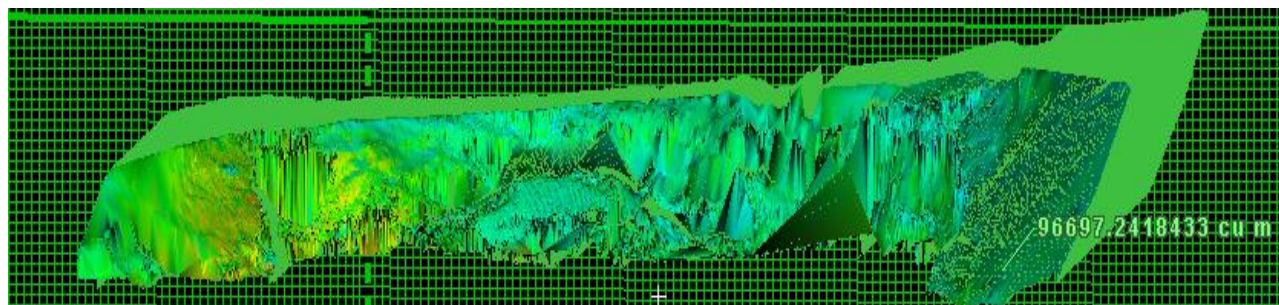


Рис. 4.11 Визначення поверхневого об'єму південної частини льодовика на о. Вінтер у 2013р.

За результатами наземного лазерного сканування (2013 р., 2014 р., 2018 р.) та цифрового стереофотограмметричного знімання (2013 р., 2014 р., 2018 р., 2019 р.) (Marusazh, Hlotov & Siejka, 2019, Марусаж, Глотов, 2020) західного та південного виходів льодовика острова Галіндез та південного виходу льодовика на острові Вінтер. встановлено зміни поверхневих об'ємів (таблиця 4.7).

Таблиця 4.7

Результати визначення змін 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

Побудова номограм змін поверхневих об'ємів. Для аналізу змін поверхневих об'ємів побудовано номограми змін поверхневих об'ємів виходів льодовиків та лінії тренду (рис. 4.12-рис. 4.14).

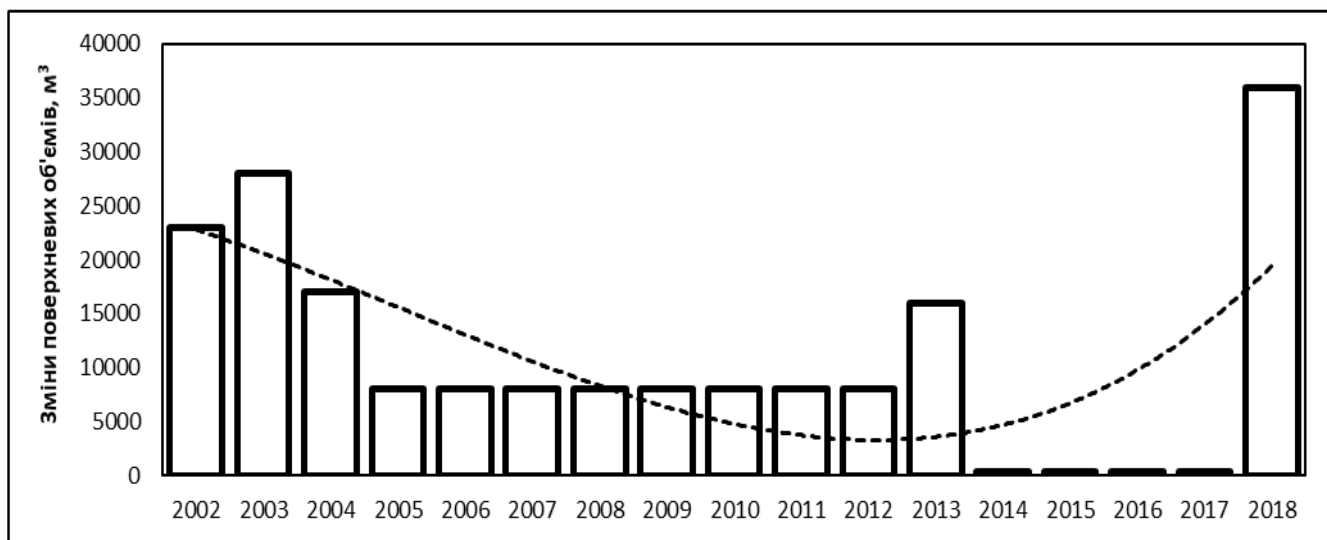


Рис. 4.12 Номограма змін поверхневих об'ємів виходу західної сторони льодовика на о. Галіндез

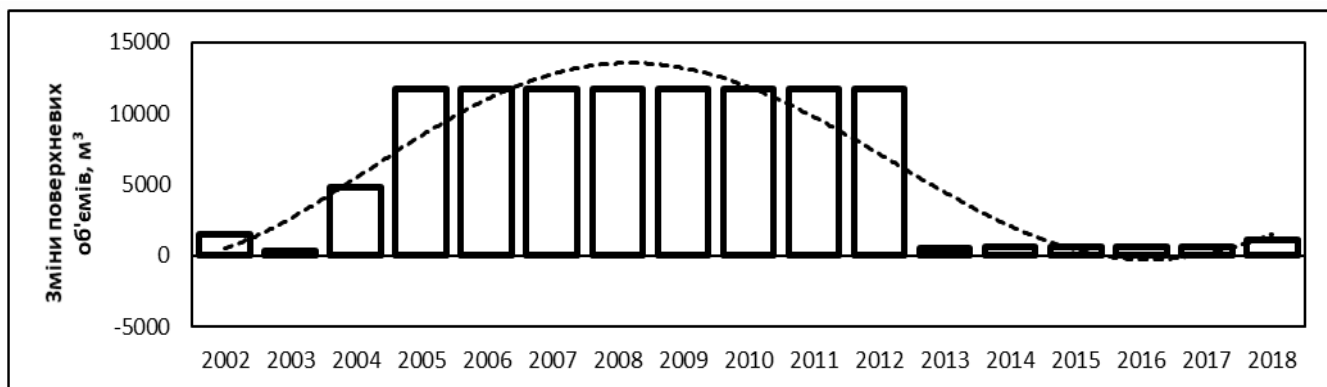


Рис. 4.13 Номограма змін поверхневих об'ємів виходу південної сторони льодовика на о. Галіндез

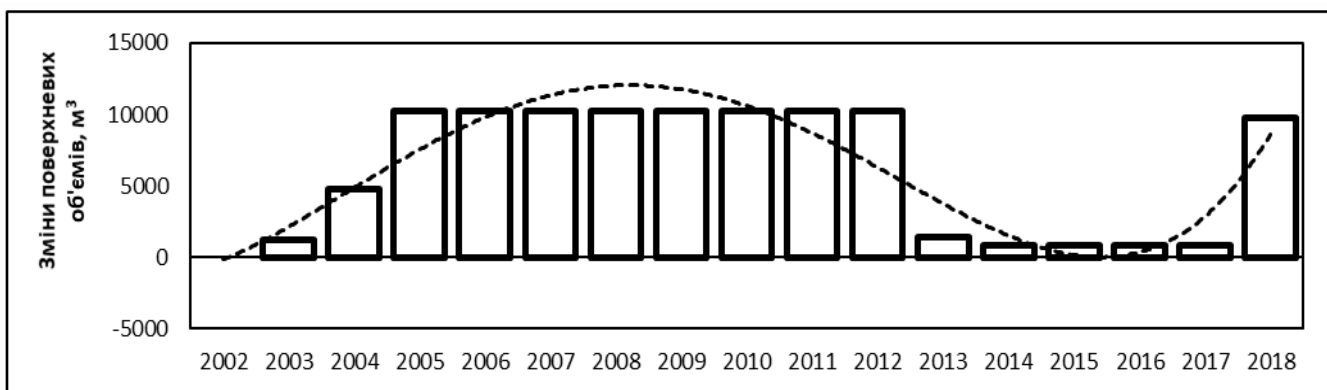


Рис. 4.14 Номограма змін поверхневих об'ємів виходу південної сторони льодовика на о. Вінтер

Аналізуючи отримані результати, можна помітити кардинальні зміни, які виникли з 2002 р. Це підтверджується визначеними кількісними параметрами, отриманими двома методами.

За даними (Cisak et al, 2008, Capra & Dietrich, 2008) за 2000-2005 роки льодовик острова Галіндез загалом втратив 2–3% свого об'єму, що в середньому становить 20000 м³/рік. Результати досліджень (Bednarczyk et al, 2015, Tretyak, Hlotov, Holubinka & Marusazh, 2016) свідчать, що середня швидкість зменшення об'єму західної частини льодовика Галіндез становить 12000 м³/рік, південної частини льодовика Галіндез – 9150 м³/рік, а південної частини льодовика Вінтер – 8800 м³/рік.

З наведених результатів моніторингу льодовиків островів Галіндез та Вінтер за 2014–2019 роки можна зробити висновок про зменшення їх об'ємів, проте зміни є неоднорідними. Як вже зазначалось вище, на значення змін об'ємів впливає товщина снігового покриву, що може спотворювати результати досліджень. Тому, варто відзначити, що вимірювання у 2018 році виконано після снігопаду, що ймовірно призвело до несуттєвих змін поверхневих об'ємів досліджуваних льодовиків у 2014-2018 роках і можливо недооцінених змін у 2018-2019 роках. Негативним чинником, який ускладнює оцінку отриманих результатів, є також нерегулярність моніторингу (великі проміжки часу між циклами спостережень).

Порівнюючи зміни об'ємів фронтальних частин льодовиків на островах Галіндез та Вінтер з результатами обчислень об'ємів льоду для всієї поверхні льодовиків (Karūšs et al., 2019) можна зробити висновок, що за 2013-2019 роки льодовик острова Галіндез загалом втратив до 3 % свого об'єму, а Вінтера – до 2%.

Загальна тенденція щодо танення льодовиків Антарктичного півострова також простежується в публікаціях результатів сучасних досліджень. Підтвердження, що АП швидко реагує на кліматичні зміни подано в роботі п (Silva et al., 2020). За спостереженнями авторів для островів Антарктичного півострова характерним є танення льодовиків. Зменшення їх площі складає

279 км² за 2001-2015 роки. Наприклад, площа льодовиків на острові короля Георга зменшились на 9,41 км² (Rosa et al., 2015), на Шетландських островах – 61% льодовиків зменшився у площі (Osmanoğlu et al., 2014). За результатами спостережень протягом 1956-2004 років (Maksymchuk, Kuznetsova, Chobotok & Dotsenko, 2002, Глотов et al., 2004) значно зменшився в розмірах і льодовик на о. Галіндез. За дослідженнями (Chernov, Karušs, Lamsters, Krievāns & Otruba, 2018), максимальну товщину льоду виявлено на льодовиковому куполі острова Галіндез – 35 метрів, що відрізняється від максимальної товщини – 59 м за результатами радіолокаційних досліджень у 1998 р. (Бахмутов, 1998, 2006, Бахмутов et al., 2006) та 45–48 м за дослідженнями 2004 р. (Levashov et al., 2004).

Аналізуючи зміни температури (рис. 1.3) та об'ємів льодовиків (Таблиця 4.7) на островах Галіндез та Вінтер, виявлено залежність між цими показниками. В подальших дослідженнях для своєчасного виявлення змін льодовиків та встановлення закономірностей з регіональними мінливостями клімату планується встановити функціональні залежності між змінами температури та об'ємів льодовиків за даними щорічного моніторингу

4.4 Перспективи вдосконалення методики

В п.3.3 запропоновано алгоритм оптимізації інтервалу ЦМР для визначення об'ємів льодовиків. Варто наголосити, що розрахунок оптимального інтервалу ґрунтується на вимогах до точності визначення об'ємів льодовиків. Тому, для вдосконалення ЦМР і в подальшому 3D моделей пропонується спосіб підвищення точності побудови ЦМР поверхні виходів льодовиків (Глотов & Марусаж, 2016).

Як вже зазначалось вище, в нашому випадку для побудови цифрової моделі рельєфу передбачається задання регулярної сітки з квадратною елементарною коміркою, сторони якої рівні обчисленому інтервалу і паралельні осям координат (рис. 4.15). У вузлах сітки (вершинах елементарних комірок) визначають планові координати (X , Z) та значення глибини поверхні виходів льодовиків – Y . Виконавши відповідну побудову ЦМР поверхні виходу льодовика отримано

дискретний набір точок – вузлів ЦМР. Причому серед цих точок немає співпадаючих, а також відомі (виміряні) значення в цих точках.

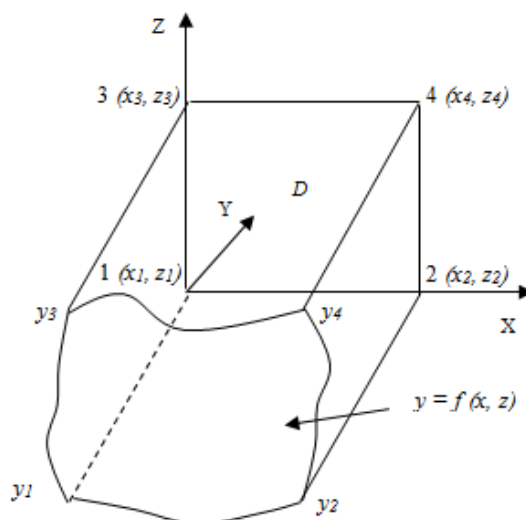


Рис. 4.15 Схематичне подання елементарної області об'єкта

Для уточнення ЦМР поверхні виходу льодовика виконано локальну інтерполяцію в кожній елементарній комірці. Вважатимемо поверхню виходу льодовика деякою функцією $y=f(x,z)$, а вузли ЦМР)– інтерполяційними вузлами.

Для задачі інтерполювання важливим є визначення того, як повинна вести себе інтерполяційна функція між заданими точками, так як ці точки можуть бути інтерпольовані множиною різноманітних функцій, і необхідно мати певний критерій вибору. Зазвичай, критеріями є гладкість та простота побудови. Більшість інтерполяційних функції генеруються лінійними комбінаціями найпростіших функцій. Важливим класом інтерполяційних функцій є множина алгебраїчних поліномів. Поліноми мають переваги з точки зору алгоритмізації.

Варто зауважити, що при інтерполяції поліномами не будь-яке число вузлів інтерполяції вигідно. Якщо для однієї змінної степінь полінома взаємно однозначно пов'язаний з числом вузлів, то для двох змінних поліном n -го степеня $Pn(x,z)$ має $(n + 1) * (n + 2)/2$ вузлів. Якщо число вузлів не відповідає цій формулі, то частина коефіцієнтів при вищих степенях повинна задаватися примусово (зокрема нулями): для вибору цих коефіцієнтів рідко мають вагомні підстави. Також, не всяке розташування вузлів допустиме: в одновимірному випадку вузли не повинні збігатися, при інтерполяції поліномом $P1(x,z)$ необхідно, щоб вузли не

лежали на прямій в площині (x, z) . При інтерполяції поліномом $P_n(x, z)$ потрібно, щоб вузли не лежали на кривій n -го порядку (Турчак & Плотников, 2002). Для інтерполяції сітка повинна бути регулярною (Тюфлин, Степаньянц, Князь & Желтов, 2004).

Враховуючи вищевикладене, для інтерполяції значень функції між вузлами застосуємо інтерполяційний поліном Лагранжа другого степеню. Поліном Лагранжа в явному вигляді містить значення функцій у вузлах інтерполяції, тому його зручно застосовувати коли значення функцій змінюються, а вузли інтерполяції незмінні. Кількість арифметичних операцій, необхідних для побудови полінома Лагранжа, пропорційне n^2 і є найменшим для всіх форм запису. До недоліків цієї форми запису можна віднести те, що зі зміною кількості вузлів потрібно всі обчислення виконувати спочатку.

Нехай на відрізку $[1, 2]$ функція $y=f(x, z)$ задана системою точок $\{(x_1, z_1), (x_2, z_2), (x_3, z_3), (x_4, z_4)\}$, де значення $(x_1, z_1), (x_2, z_2), (x_3, z_3), (x_4, z_4)$ – вузли інтерполяції. Необхідно знайти аналітичну залежність $P(x, z)$, що співпадає у вузлах інтерполяції зі значеннями заданої функції, тобто $y_1=P(x_1, z_1)=f(x_1, z_1), \dots, y_4=P(x_4, z_4)=f(x_4, z_4)$. Варто зазначити, що в такій постановці задачі вузли інтерполяції можуть бути довільно розташовані один від одного на відрізку $[1, 2]$, іншими словами, вузли інтерполяції не рівновіддалені, тобто $h_x=x_{i+1}-x_i \neq \text{const}$ ($i=0, 1, \dots, n-1$), $h_z=z_{i+1}-z_i \neq \text{const}$ ($i=0, 1, \dots, n-1$). Величина h_x та h_z називається кроком інтерполяції по осі x та z відповідно.

Варто зазначити, що задача інтерполювання стає однозначною, якщо в якості функції $P(x, z)$, вибрати багаточлен $P_n(x, z)$ степені не вище n , такий, що $P_n(x_1, z_1)=y_1, \dots, y_4=P_n(x_4, z_4)=y_4$.

Загальна формула Лагранжа матиме вигляд:

$$P_{k,m}(x, z) = \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^m y_{ij} \prod_{\substack{p=0 \\ p \neq i}}^k \prod_{\substack{q=0 \\ q \neq j}}^m \frac{(x - x_p)(z - z_q)}{(x_i - x_p)(z_j - z_q)} \quad (4.1)$$

де, k і m – кількість вузлів по сторонах прямокутної сітки.

Похибка наближення функції інтерполяційним поліномом Лагранжа:

$$R_{k,m}(x, z) = f(x, z) - P_{k,m}(x, z) \quad (4.2)$$

Величина похибки $R_{k,m}(x, z)$ залежить від x, z і від розташування точки. Оцінка точності для формули Лагранжа має вигляд:

$$R(x, z) = f^{(k+1)}(x^*) f^{(m+1)}(z^*) * \frac{(x-x_0)(x-x_1)\dots(x-x_k)(z-z_0)(z-z_1)\dots(z-z_m)}{(k+1)!(m+1)!} \quad (4.3)$$

де: $f^{(k+1)}x^*$ - похідна $k+1$ -го порядку функції $f(x)$ в деякій точці $x+x^*$, $x^* \in [x_0, x_k]$, $f^{(m+1)}z^*$ - похідна $m+1$ -го порядку функції $f(z)$ в деякій точці $m+m^*$, $z^* \in [z_0, z_m]$.

Розглянемо випадок пошуку $y=f(x, z)$ за відомими $y_{ij}=f(x_i, z_j)$ в найближчих чотирьох вузлах – вершинах прямокутника ($k:=1..2, m:=1..2$), в який потрапляє шукана точка. Тоді формула Лагранжа матиме вигляд:

$$P_{k,m}(x, z) = \frac{y_1(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)(z-z_2)(z-z_3)(z-z_4)}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)(x_1-x_4)(z_1-z_2)(z_1-z_3)(z_1-z_4)} + \frac{y_2(x-x_1)(x-x_3)(x-x_4)(z-z_1)(z-z_3)(z-z_4)}{(x_2-x_1)(x_2-x_3)(x_2-x_4)(z_2-z_1)(z_2-z_3)(z_2-z_4)} + \frac{y_3(x-x_1)(x-x_2)(x-x_4)(z-z_1)(z-z_2)(z-z_4)}{(x_3-x_1)(x_3-x_2)(x_3-x_4)(z_3-z_1)(z_3-z_2)(z_3-z_4)} + \frac{y_4(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)(z-z_1)(z-z_2)(z-z_3)}{(x_4-x_1)(x_4-x_2)(x_4-x_3)(z_4-z_1)(z_4-z_2)(z_4-z_3)} \quad (4.4)$$

Знайдемо часткові похідні по змінній x :

$$\begin{aligned} \frac{\partial y}{\partial x} = & \frac{y_1(x-x_3)(x-x_4)(z-z_2)(z-z_3)(z-z_4)}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)(x_1-x_4)(z_1-z_2)(z_1-z_3)(z_1-z_4)} + \frac{y_1(x-x_2)(x-x_4)(z-z_2)(z-z_3)(z-z_4)}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)(x_1-x_4)(z_1-z_2)(z_1-z_3)(z_1-z_4)} + \\ & + \frac{y_1(x-x_2)(x-x_3)(z-z_2)(z-z_3)(z-z_4)}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)(x_1-x_4)(z_1-z_2)(z_1-z_3)(z_1-z_4)} + \frac{y_2(x-x_3)(x-x_4)(z-z_1)(z-z_3)(z-z_4)}{(x_2-x_1)(x_2-x_3)(x_2-x_4)(z_2-z_1)(z_2-z_3)(z_2-z_4)} + \\ & + \frac{y_2(x-x_1)(x-x_4)(z-z_1)(z-z_3)(z-z_4)}{(x_2-x_1)(x_2-x_3)(x_2-x_4)(z_2-z_1)(z_2-z_3)(z_2-z_4)} + \frac{y_2(x-x_1)(x-x_3)(z-z_1)(z-z_3)(z-z_4)}{(x_2-x_1)(x_2-x_3)(x_2-x_4)(z_2-z_1)(z_2-z_3)(z_2-z_4)} + \\ & + \frac{y_3(x-x_2)(x-x_4)(z-z_1)(z-z_2)(z-z_4)}{(x_3-x_1)(x_3-x_2)(x_3-x_4)(z_3-z_1)(z_3-z_2)(z_3-z_4)} + \frac{y_3(x-x_1)(x-x_4)(z-z_1)(z-z_2)(z-z_4)}{(x_3-x_1)(x_3-x_2)(x_3-x_4)(z_3-z_1)(z_3-z_2)(z_3-z_4)} + \\ & + \frac{y_3(x-x_1)(x-x_2)(z-z_1)(z-z_2)(z-z_4)}{(x_3-x_1)(x_3-x_2)(x_3-x_4)(z_3-z_1)(z_3-z_2)(z_3-z_4)} + \frac{y_4(x-x_2)(x-x_3)(z-z_1)(z-z_2)(z-z_3)}{(x_4-x_1)(x_4-x_2)(x_4-x_3)(z_4-z_1)(z_4-z_2)(z_4-z_3)} + \\ & + \frac{y_4(x-x_1)(x-x_3)(z-z_1)(z-z_2)(z-z_3)}{(x_4-x_1)(x_4-x_2)(x_4-x_3)(z_4-z_1)(z_4-z_2)(z_4-z_3)} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Знайдемо часткові похідні по змінній y :

$$\begin{aligned}
\frac{\partial y}{\partial z} = & \frac{y_1(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)(z-z_3)(z-z_4)}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)(x_1-x_4)(z_1-z_2)(z_1-z_3)(z_1-z_4)} + \frac{y_1(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)(z-z_2)(z-z_4)}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)(x_1-x_4)(z_1-z_2)(z_1-z_3)(z_1-z_4)} + \\
& + \frac{y_1(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)(z-z_2)(z-z_3)}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)(x_1-x_4)(z_1-z_2)(z_1-z_3)(z_1-z_4)} + \frac{y_2(x-x_1)(x-x_3)(x-x_4)(z-z_3)(z-z_4)}{(x_2-x_1)(x_2-x_3)(x_2-x_4)(z_2-z_1)(z_2-z_3)(z_2-z_4)} + \\
& + \frac{y_2(x-x_1)(x-x_3)(x-x_4)(z-z_1)(z-z_4)}{(x_2-x_1)(x_2-x_3)(x_2-x_4)(z_2-z_1)(z_2-z_3)(z_2-z_4)} + \frac{y_2(x-x_1)(x-x_3)(x-x_4)(z-z_1)(z-z_3)}{(x_2-x_1)(x_2-x_3)(x_2-x_4)(z_2-z_1)(z_2-z_3)(z_2-z_4)} + \\
& + \frac{y_3(x-x_1)(x-x_2)(x-x_4)(z-z_2)(z-z_4)}{(x_3-x_1)(x_3-x_2)(x_3-x_4)(z_3-z_1)(z_3-z_2)(z_3-z_4)} + \frac{y_3(x-x_1)(x-x_2)(x-x_4)(z-z_1)(z-z_4)}{(x_3-x_1)(x_3-x_2)(x_3-x_4)(z_3-z_1)(z_3-z_2)(z_3-z_4)} + \\
& + \frac{y_3(x-x_1)(x-x_2)(x-x_4)(z-z_1)(z-z_2)}{(x_3-x_1)(x_3-x_2)(x_3-x_4)(z_3-z_1)(z_3-z_2)(z_3-z_4)} + \frac{y_4(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)(z-z_2)(z-z_3)}{(x_4-x_1)(x_4-x_2)(x_4-x_3)(z_4-z_1)(z_4-z_2)(z_4-z_3)} + \\
& + \frac{y_4(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)(z-z_1)(z-z_3)}{(x_4-x_1)(x_4-x_2)(x_4-x_3)(z_4-z_1)(z_4-z_2)(z_4-z_3)} + \frac{y_4(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)(z-z_1)(z-z_2)}{(x_4-x_1)(x_4-x_2)(x_4-x_3)(z_4-z_1)(z_4-z_2)(z_4-z_3)}
\end{aligned} \tag{4.6}$$

Обчислимо СКП визначення значення функції m_f :

$$\begin{aligned}
m_y = & \left[\left[\frac{y_1(x-x_3)(x-x_4)(z-z_2)(z-z_3)(z-z_4)}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)(x_1-x_4)(z_1-z_2)(z_1-z_3)(z_1-z_4)} + \frac{y_1(x-x_2)(x-x_4)(z-z_2)(z-z_3)(z-z_4)}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)(x_1-x_4)(z_1-z_2)(z_1-z_3)(z_1-z_4)} + \right. \right. \\
& + \frac{y_1(x-x_2)(x-x_3)(z-z_2)(z-z_3)(z-z_4)}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)(x_1-x_4)(z_1-z_2)(z_1-z_3)(z_1-z_4)} + \frac{y_2(x-x_3)(x-x_4)(z-z_1)(z-z_3)(z-z_4)}{(x_2-x_1)(x_2-x_3)(x_2-x_4)(z_2-z_1)(z_2-z_3)(z_2-z_4)} + \\
& + \frac{y_2(x-x_1)(x-x_4)(z-z_1)(z-z_3)(z-z_4)}{(x_2-x_1)(x_2-x_3)(x_2-x_4)(z_2-z_1)(z_2-z_3)(z_2-z_4)} + \frac{y_2(x-x_1)(x-x_3)(z-z_1)(z-z_3)(z-z_4)}{(x_2-x_1)(x_2-x_3)(x_2-x_4)(z_2-z_1)(z_2-z_3)(z_2-z_4)} + \\
& + \frac{y_3(x-x_2)(x-x_4)(z-z_1)(z-z_2)(z-z_4)}{(x_3-x_1)(x_3-x_2)(x_3-x_4)(z_3-z_1)(z_3-z_2)(z_3-z_4)} + \frac{y_3(x-x_1)(x-x_4)(z-z_1)(z-z_2)(z-z_4)}{(x_3-x_1)(x_3-x_2)(x_3-x_4)(z_3-z_1)(z_3-z_2)(z_3-z_4)} + \\
& + \frac{y_3(x-x_1)(x-x_2)(z-z_1)(z-z_2)(z-z_4)}{(x_3-x_1)(x_3-x_2)(x_3-x_4)(z_3-z_1)(z_3-z_2)(z_3-z_4)} + \frac{y_4(x-x_2)(x-x_3)(z-z_1)(z-z_2)(z-z_3)}{(x_4-x_1)(x_4-x_2)(x_4-x_3)(z_4-z_1)(z_4-z_2)(z_4-z_3)} + \\
& + \frac{y_4(x-x_1)(x-x_3)(z-z_1)(z-z_2)(z-z_3)}{(x_4-x_1)(x_4-x_2)(x_4-x_3)(z_4-z_1)(z_4-z_2)(z_4-z_3)} + \left. \left. \frac{y_4(x-x_1)(x-x_2)(z-z_1)(z-z_2)(z-z_3)}{(x_4-x_1)(x_4-x_2)(x_4-x_3)(z_4-z_1)(z_4-z_2)(z_4-z_3)} \right]^2 m_x^2 \right. \\
& + \left[\frac{y_1(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)(z-z_3)(z-z_4)}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)(x_1-x_4)(z_1-z_2)(z_1-z_3)(z_1-z_4)} + \frac{y_1(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)(z-z_2)(z-z_4)}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)(x_1-x_4)(z_1-z_2)(z_1-z_3)(z_1-z_4)} + \right. \\
& + \frac{y_1(x-x_2)(x-x_3)(x-x_4)(z-z_2)(z-z_3)}{(x_1-x_2)(x_1-x_3)(x_1-x_4)(z_1-z_2)(z_1-z_3)(z_1-z_4)} + \frac{y_2(x-x_1)(x-x_3)(x-x_4)(z-z_3)(z-z_4)}{(x_2-x_1)(x_2-x_3)(x_2-x_4)(z_2-z_1)(z_2-z_3)(z_2-z_4)} + \\
& + \frac{y_2(x-x_1)(x-x_3)(x-x_4)(z-z_1)(z-z_4)}{(x_2-x_1)(x_2-x_3)(x_2-x_4)(z_2-z_1)(z_2-z_3)(z_2-z_4)} + \frac{y_2(x-x_1)(x-x_3)(x-x_4)(z-z_1)(z-z_3)}{(x_2-x_1)(x_2-x_3)(x_2-x_4)(z_2-z_1)(z_2-z_3)(z_2-z_4)} + \\
& + \frac{y_3(x-x_1)(x-x_2)(x-x_4)(z-z_2)(z-z_4)}{(x_3-x_1)(x_3-x_2)(x_3-x_4)(z_3-z_1)(z_3-z_2)(z_3-z_4)} + \frac{y_3(x-x_1)(x-x_2)(x-x_4)(z-z_1)(z-z_4)}{(x_3-x_1)(x_3-x_2)(x_3-x_4)(z_3-z_1)(z_3-z_2)(z_3-z_4)} + \\
& + \frac{y_3(x-x_1)(x-x_2)(x-x_4)(z-z_1)(z-z_2)}{(x_3-x_1)(x_3-x_2)(x_3-x_4)(z_3-z_1)(z_3-z_2)(z_3-z_4)} + \frac{y_4(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)(z-z_2)(z-z_3)}{(x_4-x_1)(x_4-x_2)(x_4-x_3)(z_4-z_1)(z_4-z_2)(z_4-z_3)} + \\
& + \left. \left. \frac{y_4(x-x_1)(x-x_2)(x-x_3)(z-z_1)(z-z_2)}{(x_4-x_1)(x_4-x_2)(x_4-x_3)(z_4-z_1)(z_4-z_2)(z_4-z_3)} \right]^2 m_z^2 \right]^{\frac{1}{2}}
\end{aligned} \tag{4.7}$$

Тоді, величина похибки інтерполяції буде:

$$R(x, z) = \frac{(x - x_1)(x - x_2)(x - x_3)(x - x_4) *}{(2 + 1)!(2 + 1)!} * (z - z_1)(z - z_2)(z - z_3)(z - z_4) f^{(k+1)}(x^*) f^{(m+1)}(z^*) \quad (4.8)$$

Запропонований спосіб підвищення точності побудови цифрової моделі поверхні виходів апробовано з застосуванням програмного продукту Microsoft Office – Excel. Проте такий спосіб апробації практично не є автоматизованим. Тому для автоматизації процесів варто застосувати програмні продукти, що належать до середовищ програмування.

4.5 Висновки до розділу 4

Апробовано методику комплексного дослідження змін поверхневих об'ємів острівних льодовиків, що дозволило значно підвищити точність отримання кількісних параметрів об'єктів дослідження, зокрема поверхонь льодовиків.

За запропонованим алгоритмом оптимізації розраховано інтервал сітки для побудови ЦМР, що забезпечить визначення змін об'ємів з точністю до 1%.

Апробовано алгоритм виявлення «мертвих» зон НЛС та побудовано полігони, що слугують маскам за побудови ЦМР на ЦФС.

Опрацьовано матеріали польових робіт, отриманих методами НЦЗ та НЛС. Точкові моделі отримані за даними НЛС та цифрові моделі поверхонь льодовика, отримані за даними НЦЗ, що покривають «мертві» зони хмар точок, об'єднано в узгоджені точкові моделі. Побудовано TIN моделі та площини початкового відліку для кожного з виходів льодовиків.

Визначено поверхневі об'єми відносно площин початкового відліку. Зміни поверхневих об'ємів острівних льодовиків обчислено як різниці об'ємів між циклами спостережень.

Визначено та проаналізовано зміни поверхневих об'ємів виходів острівних льодовиків упродовж 2013-2014, 2014-2018 років. В результаті за 2013-2014 роки об'єм західної частини льодовика на о. Галіндез зменшився на

16000 м³, південної частини цього льодовика – 500 м³, а для 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 для льодовика на о. Вінтер – 800 м³. Наведені результати свідчать про загальну тенденцію зменшення льодовиків та неоднорідність їх змін.

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 оперативної 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 методику 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 ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

- Азаров, Б. Ф., & Карелина, И. В. (2018). К вопросу определения метрологических характеристик наземного лазерного сканера TOPCON GLS-1500. *Ползуновский вестник*, (1), 88-93.
- Амромин, П. Д. (1991). Зеркальный тест-объект для калибровки фотокамер. *Геодезия и картография*, 6, 29-34.
- Бабушка, А. В. (2012). Особливості відбиття лазерного променя від водних об'єктів. *Геодезія, картографія і аерофотознімання: міжвідомчий науково-технічний збірник*, 76, 66-69.
- Бахмутов, В. Г. (1998). Геологический обзор архипелага Аргентинские острова и прилегающей территории Антарктического полуострова. *Бюлл. УАЦ*, (2), 77-84.
- Бахмутов, В. Г. (2006). Эволюция и геодинамика основных структур Западной Антарктики в мезо-кайнозой: современные представления. *Український антарктичний журнал*, 4, 52-63.
- Бахмутов, В. Г., Ващенко, В. Н., Грищенко, В. Ф., Корчагин, И. Н., Левашов, С. В., & Пищаный, И. Н. (2006). Методы и результаты измерений мощности ледников Малый Уиггэнс (Антарктический полуостров) и Домашний (остров Галиндез). *Український антарктичний журнал*, 4-5, 47-51.
- Бурак, К., Ковтун, В., & Левицкий, Р. (2015). Визначення щільності регулярної сітки бікубічної сплайн-інтерполяції при створенні ЦМР. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 29(1), 133-139.
- Бурак, К., Ковтун, В., Левицкий, Р., & Ничвид, М. (2014). Дослідження особливостей та точності побудови ЦМР за допомогою бікубічної сплайн-інтерполяції. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, (2), 32-36.
- Бурштинська, Х., Тумська, О., & Лелюх, Д. (2000). Застосування кореляційно-спектрального аналізу для вибору інтервалу при побудові цифрової моделі рельєфу. *Матеріали 2-ї Міжнародної науково-практичної конференції*

"Кадастр, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології і перспективи розвитку" (с. 98-102).

- Быков, А. Л. (2012). Исследования методики калибровки аэрофотокамер на равнинном испытательном полигоне. *Геодезия и картография*, (6), 32-35.
- Быков, А. Л., Быков, В. Л., & Быков, Л. В. (2016). Особенности полевой калибровки цифровых фотокамер по снимкам равнинного испытательного полигона. *Вестник Омского государственного аграрного университета*, 3 (23), 149-154.
- Гельман, Р. Н. (1982). Точность измерений по снимкам, полученным неметрической камерой. *Геодезия и картография*, 7, 29-32.
- Глотов, В. М. (2006). Моніторинг острівних льодовиків Антарктичного узбережжя. *Вісник геодезії та картографії*, (1), 31-34.
- Глотов, В. М., & Марусаж, Х. І. (25.07.2019). *Патент на корисну модель №135876 Україна, МПК UA G01C 11/00*. Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової знімальної камери. № у 2019 01125; подан. 04.02.2019 р., Бюл. №14.
- Глотов, В. М., & Марусаж, Х. І. (25.10.2016). *Патент на корисну модель № 110910 Україна, МПК UA G01C 11/00*. Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової знімальної камери. № у 2016 03935; подан. 11.04.2016 р., Бюл. №20.
- Глотов, В. М., & Пащетник, О. Д. (10.02.2015). *Патент на винахід № 107756 Україна, МПК UA G01C 11/02*. Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової знімальної камери. № а201312842; подан. 04.11.13 р., Бюл. № 3.
- Глотов, В. М., & Пащетник, О. Д. (25.10.2012). *Патент на винахід №99984 Україна, МПК UA G01C 11/00*. Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової неметричної знімальної камери. № а 2011 09071; подан. 20.07.2011 р., Бюл. №20.
- Глотов, В. М., & Пащетник, О. Д. (26.04.2011). *Патент на винахід № 94376 Україна, МПК UA G01M 11/02*. Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової знімальної камери. № а 2010 12265; подан. 18.10.2010, Бюл. №8.
- Глотов, В. М., & Смолій, К. Б. (2009). Априорна точність складання фронтальних планів методом сумісного використання лазерного сканування та наземного

- цифрового знімання. *Геодезія, картографія і аерофотознімання: міжвідомчий науково-технічний збірник*, 72, 65-68.
- Глотов, В., & Марусаж, Х. (2013). Аналіз методів створення фронтальних планів лазерним наземним скануванням та цифровим зніманням. *Геодезія, картографія і аерофотознімання: міжвідомчий науково-технічний збірник*, 78, 30-37.
- Глотов, В., & Марусаж, Х. (2016). Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової неметричної знімальної камери. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 31(1), 105-110.
- Глотов, В., & Марусаж, Х. (2019). Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової неметричної знімальної камери. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 37(1), 85-90.
- Глотов, В., & Марусаж, Х. І. (2015). Оптимізація інтервалу сітки для побудови ЦМР під час визначення поверхневих об'ємів острівних льодовиків Антарктичного узбережжя. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, 82, 95-109.
- Глотов, В., & Пащетник, О. (2010). Спосіб визначення фокусної віддалі цифрових неметричних знімальних камер. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 20(2), 150-153.
- Глотов, В., & Пащетник, О. (2013). Лінійний спосіб визначення елементів внутрішнього орієнтування цифрових неметричних знімальних камер. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, 78, 71-76.
- Глотов, В., Ковальонок, С., & Чижевський, В. (2004). Кількісні параметри острівних льодовиків за результатами цифрового стереофотограмметричного знімання. *Український антарктичний журнал*, 2, 58-65.
- Глотов, В. М., & Марусаж, Х. І. (2016). Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової неметричної камери. *Програма та тези конференції. 21-ша Міжнародна науково-технічна конференція «Геофорум-2016»*. (с. 40-41).
- Глотов, В. М., & Марусаж, Х. І. (2016). Спосіб підвищення точності побудови цифрової моделі поверхні виходів острівних льодовиків Антарктичного

- узбережжя. *Збірник матеріалів конференції Міжнародна науково-технічна конференція молодих вчених «GeoTerrace-2016»* (с. 117-121).
- Глотов, В. М., & Марусаж, Х. І. (2019). Спосіб визначення фокусної віддалі цифрової неметричної камери. *Тези доповідей. 24-а Міжнародна науково-технічна конференція «Геофорум-2019»*. (с. 38-39).
- Глотов, В.М. (2005). Визначення динаміки поверхневих об'ємів острівних льодовиків як складова частина ГІС "Антарктида". *Збірник наукових праць X Міжнародного науково-технічного симпозиуму "Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GNSS і GIS-технології", 10 – 15 вересня 2012 р., Алушта* (с. 172-176).
- Гожик, П. Ф., Литвинов, В. А., & Маланчук, В. М. (2015). Двадцять років в Антарктиці: основні досягнення та перспективи. *Ukrainian Antarctic journal*, (14), 9-23.
- Дубиновский, В. Б. (1982). *Калибровка снимков*. Недра.
- Зазуляк, П. М., Гавриш, В. І., Євсєєва, Е. М., & Йосипчук, М. Д. (2007). Основи математичного опрацювання геодезичних вимірювань. *Львів: Растр-7*.
- Карпінський, Ю. О., & Лященко, А. А. (2000). Орографічно-триангуляційна цифрова модель рельєфу. *Вісник геодезії та картографії*, 3, 28-32.
- Катушков, В. О., Шульц, Р. В., & Сосса, Б. Р. (2012). Співвідношення між очікуваною точністю наземного лазерного сканування та вимогами до точності виконання інженерно-геодезичних робіт. *Містобудування та територіальне планування*, 44, 238-248.
- Катушков, В. О., Мархвіда, В. Г., Пастух, В. В., Панкратьєв, Ю. М., & Сердюков, В. М. (1994). *Прикладна фотограмметрія*. Навчальний посібник. Київ: ІСДО.
- Книжников, Ю. Ф., & Федоренко, В. С. (1977). *Склоновые процессы. Выпуск 2. Фотограмметрический метод изучения склоновых процессов*. Издательство Московского университета.
- Литвинов, В. А., & Федчук, А. П. (2014). Пріоритети антарктичної науки. *Український антарктичний журнал*, 13, 9-14.

- Лобанов, А. Н. (1983). *Фототопография. Наземная стереофотограмметрическая съёмка* (4 изд.). Москва: Недра.
- Малицький, А. (2017). Порівняння результатів трансформації 3D-сканів. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, 86, 58-69.
- Малявский, Б. К., Быков, Л. В., Быков, В. Л., & Макаров, А. П. (10.10.2007). *Патент № 2308001 РФ, МПК G01C 11/02*. Способ фотограмметрической калибровки фотокамер. Подан 18.01.2006.
- Марусаж, Х. (2014). Аналіз сучасних методів дослідження кількісних параметрів льодовиків. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 27(1), 109-117.
- Марусаж, Х., Глотов, В (2020). Результати моніторингу виходів льодовиків островів Галіндез та Вінтер у 2018–2019 роках. *Матеріали 25-ї Міжнародна науково-технічної конференції «Геофорум-2020»* (с.40-43).
- Михайлов, А. П., Чибуничев, Д. А., & Курков, Д. В. (2012). Применение цифровых неметрических камер и лазерных сканеров для решения задач фотограмметрии. <https://docplayer.ru/>.
- Михеева, А. А. (2011). О переменном фокусном расстоянии. *Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F, Прикладные науки. Строительство*, 16, 146-150.
- Пашетник, О. Д. (2012). Розробка та дослідження методів визначення елементів внутрішнього орієнтування неметричних цифрових камер. *Дисертація на здобуття ступеня кандидата технічних наук: 05.24.01*. Національний університет "Львівська політехніка".
- Рассказова, Н. С., & Бобылев, А. В. (2010). Представление данных цифровых моделей рельефа в экологических геоинформационных системах (на примере геоинформационной системы Шершнёвского водохранилища). *Вестник Челябинского государственного университета*, 189 (8), 36-39.
- Рудий, Р.М., Кравець, О.Я. (2019). Рельєф стартових зон виникнення снігових лавин на Чорногірському хребті Українських Карпат. *Науковий вісник НЛТУ України*, 29 (2), 91-93.

- Середович, В. А., Комиссаров, А. В., Комиссаров, Д. В., & Широкова, Т. А. (2009). *Наземное лазерное сканирование*. Новосибирск: СГГА.
- Третьяк, К. Р., Глотов, В. М., & Голубінка, Ю. І. (2013). Значення поверхневих об'ємів острівних льодовиків Антарктичного узбережжя як показник зміни кліматичних умов. *Український антарктичний журнал*, 12, 69-82.
- Третьяк, К., Глотов, В., & Голубінка, Ю. (2013). Аналіз результатів моніторингу острівних льодовиків Антарктичного узбережжя лазерним скануванням та цифровим стереофотограмметричним методом. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, 26(2), 130-136.
- Третьяк, К., Глотов, В., Голубінка, Ю., & Марусаж, Х. (2013). Результати визначення поверхневих об'ємів острівних льодовиків антарктичного узбережжя комплексним методом. *Збірник наукових праць. XVIII Міжнародний науково-технічний симпозиум «Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GNSS і GIS – технології», Алушта, 10-15 вересня (с. 9-16)*.
- Турчак, Л. И., & Плотников, П. В. (2002). *Основы численных методов*. Физматлит.
- Тюфлин, Ю. С., Степаньянц, Д. Г., Князь, В. А., & Желтов, С. Ю. (2004). Предвычисление точности определения координат точек объекта в ближней фотограмметрии. *Геодезия и картография*, 11, 29-32.
- Шульц, Р. В. (2010). Аналіз можливостей наземного лазерного сканування та сучасної наземної фотограмметрії. *Містобудування та територіальне планування*, (37), 607-612.
- Шульц, Р. В. (2011). Аналіз сучасного стану та технічних можливостей методу наземного лазерного сканування. *Містобудування та територіальне планування*, (41), 474-488.
- Шульц, Р. В. (2011). Перетворення між різними системами координат при виконанні наземного лазерного сканування та цифрового фотографування. *Містобудування та територіальне планування*, (42), 437-446.

- Шульц, Р. В., & Сосса, Б. Р. (2015). Системне калібрування наземних лазерних сканерів: моделі та методики. *Вісник геодезії та картографії*, (2), 25-30.
- Antarctic meteorology online from the British Antarctic survey*. British Antarctic Survey. <https://www.nerc-bas.ac.uk/icd/metlog/> (last accessed:9/11/2020).
- Avian, M., Kellerer-Pirklbauer, A., & Lieb, G. K. (2018). Geomorphic consequences of rapid deglaciation at Pasterze Glacier, Hohe Tauern Range, Austria, between 2010 and 2013 based on repeated terrestrial laser scanning data. *Geomorphology*, 310, 1-14.
- Bae, K. H., & Lichti, D. D. (2007). On-site self-calibration using planar features for terrestrial laser scanners. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 36, 14-19.
- Barrand, N. E., Vaughan, D. G., Steiner, N., Tedesco, M., Kuipers Munneke, P., Van den Broeke, M. R., & Hosking, J. S. (2013). Trends in Antarctic Peninsula surface melting conditions from observations and regional climate modeling. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(1), 315-330.
- Bednarczyk, M., Biryło, M., Dawidowicz, A., Dawidowicz, K., Hlotov, V., Kowalczyk, K., ... & Wróbel, A. (2015). Modern geodetic techniques in spatial measurement. In *GIS Forum, Zagreb*.
- Blaskow, R., & Schneider, D. (2014). Analysis and correction of the dependency between laser scanner intensity values and range. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40(5), 107.
- Boehler, W., Vicent, M. B., & Marbs, A. (2003). Investigating laser scanner accuracy. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(Part 5), 696-701.
- Bucksch, A., Lindenbergh, R., & Van Ree, J. (2007, April). Error budget of Terrestrial Laser scanning: Influence of the intensity remission on the scan quality. In *GeoSiberia 2007-International Exhibition and Scientific Congress* (pp. 59). European Association of Geoscientists & Engineers.
- Cahyono, B. K., Matori, A. N., Atunggal, D., Basith, A., & No, J. G. (2009). Characterizing accuracy of DEM derived from close-range

- photogrammetric. In *Prosiding Seminar Nasional Revitalisasi Data dan, Sains-Teknik, Prosiding Seminar/Lokakarya/Konferensi*, <http://lib.ugm.ac.id/digitasi/index.php>.
- Cahyono, B. K., Matori, A. N., Basith, A., & Atunggal, D. (2009). Landslide detection on slope area by using close-range photogrammetric data. In *Prosiding Seminar Nasional Revitalisasi Data dan, Sains-Teknik, Prosiding Seminar/Lokakarya/Konferensi*, <http://lib.ugm.ac.id/digitasi/index.php>.
- Canon EOS 6D. Технічні характеристики. Canon Ukraine. https://www.canon.ua/for_home/product_finder/cameras/digital_slr/eos_6d/specification.html
- Capra, A., & Dietrich, R. (Eds.). (2008). *Geodetic and geophysical observations in Antarctica: an overview in the IPY perspective*. Berlin: Springer.
- Carrea, D., Abellan, A., Humair, F., Matasci, B., Derron, M. H., & Jaboyedoff, M. (2016). Correction of terrestrial LiDAR intensity channel using Oren–Nayar reflectance model: An application to lithological differentiation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 113, 17-29.
- Chandler, J., Ashmore, P., Paola, C., Gooch, M., & Varkaris, F. (2002). Monitoring river-channel change using terrestrial oblique digital imagery and automated digital photogrammetry. *Annals of the Association of American Geographers*, 92(4), 631-644.
- Chernov, A. P. (2017). Informativeness of ground penetrating radar method for investigations of the glaciers on Galindez, Winter and Skua islands (the Argentine Islands, results for the period April to November 2017). *Український антарктичний журнал*, 16, 29-36.
- Chernov, A., Karušs, J., Lamsters, K., Krievāns, M., & Otruba, Y. (2018, November). First results of glacier monitoring on Woozle Hill (Galindez Island, the Argentine Islands, Antarctica) for the period April 2017–August 2018. In *12th International Conference on Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment*. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201803152>.

- Chernov, A., Lamsters, K., Karušs, J., Krievāns, M., & Otruba, Y. (2018). A brief review of ground penetrating radar investigation results of ice caps on Galindez, Winter and Skua Islands (Wilhelm Archipelago, Antarctica) for the period April 2017–January 2019. *Ukrainian Antarctic Journal*, 17 (1), 40-47.
- Cisak, J., Milinevsky, G., Danylevsky, V., Glotov, V., Chizhevsky, V., Kovalenok, S., ... & Zanimonskiy, Y. (2008). Atmospheric impact on GNSS observations, sea level change investigations and GPS-photogrammetry ice cap survey at Vernadsky Station in Antarctic Peninsula. In *Geodetic and Geophysical Observations in Antarctica* (pp. 191-209). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Cook, A. J., & Vaughan, D. G. (2010). Overview of areal changes of the ice shelves on the Antarctic Peninsula over the past 50 years. *The Cryosphere*, 4(1), 77-98.
- Cook, A. J., Fox, A. J., Vaughan, D. G., & Ferrigno, J. G. (2005). Retreating glacier fronts on the Antarctic Peninsula over the past half-century. *Science*, 308(5721), 541-544.
- Cook, A. J., Vaughan, D. G., Luckman, A. J., & Murray, T. (2014). A new Antarctic Peninsula glacier basin inventory and observed area changes since the 1940s. *Antarctic Science*, 26(6), 614-624.
- Corner, R. W. M., & Smith, R. I. (1973). Botanical evidence of ice recession in the Argentine Islands. *British Antarctic Survey Bulletin*, 35, 83-86.
- Dai, T. F., & Hollyer, G. M. (2004). An optimized gravity terrain correction algorithm and test results from the Rio Tinto Valley, Spain. Geosoft Inc, Toronto, Canada.
- Deems, J. S., Painter, T. H., & Finnegan, D. C. (2013). Lidar measurement of snow depth: a review. *Journal of Glaciology*, 59(215), 467-479.
- Dietrich, R., Dach, R., Engelhardt, G., Ihde, J., Korth, W., Kutterer, H. J., ... & Völksen, C. (2001). ITRF coordinates and plate velocities from repeated GPS campaigns in Antarctica—an analysis based on different individual solutions. *Journal of Geodesy*, 74(11), 756-766.
- Digitals. <https://www.vinmap.net/> (last accessed: 9/11/2020).

- Dorninger, P., Nothegger, C., Pfeifer, N., & Molnár, G. (2008). On-the-job detection and correction of systematic cyclic distance measurement errors of terrestrial laser scanners. *Journal of Applied Geodesy*, 2(4), 191-204.
- Dorozhynskyy, O., Milinevskyy, H., & Hlotov, V. (2004). Photogrammetric research conducted at the Antarctic station “Academician Vernadskyy”. In *Proceedings Volume IAPRS XXXV B4 XXth ISPRS Congress* (pp. 642-644).
- Dyurgerov, M. B. (2010). Reanalysis of glacier changes: from the IGY to the IPY, 1960–2008. *Data of Glaciological Studies*, 108, 1-116.
- Ebrahim, B. (2005, September). Studying the effect of some image enhancement features on the accuracy of close range photogrammetric measurements using CAD environment. In *International Symposium* (Vol. 26).
- EOS digital rebel XSi. Canon camera Museum. Canon Global. <https://global.canon/en/c-museum/product/dslr797.html>
- Erten, E., Rossi, C., & Hajsek, I. (2012, July). Glacier surface monitoring by maximizing mutual information. In *XXII International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Congress, Melbourne, Australia* (pp.41-44).
- Fallourd, R., Vernier, F., Friedt, J. M., Martin, G., Trouvé, E., Moreau, L., & Nicolas, J. M. (2010, September). Monitoring temperate glacier with high resolution automated digital cameras-application to the Argentiere glacier. In *PCV 2010, ISPRS Commission III Symposium*. Paris (pp.19-23).
- Fang, L., Maksymiuk, O., Schmitt, M., & Stilla, U. (2013, April). Determination of glacier surface area using spaceborne SAR imagery. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Hannover Workshop* (pp. 105-110).
- FARO SCENE software. 3D Measurement, Imaging & Realization Solutions. <https://www.faro.com/en/Products/Software/SCENE-Software> (last accessed: 9/11/2020).
- Ferreira de Mendonça, L. F. (2012). Monitoring glacier variations in the Southern Patagonia icefield utilizing images Landsat 7 ETM+. *ISPRS-International Archives*

- of the *Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39, 567-571.
- Fidera, A., Chapman, M. A., & Hong, J. (2004, July). Terrestrial lidar for industrial metrology applications: modelling, enhancement and reconstruction. In *XXth ISPRS congress* (Vol. 5, pp. 880-886).
- Fleming, W. L. S. (1940). Relic glacial forms on the western seaboard of Graham Land. *The Geographical Journal*, 96(2), 93-100.
- Fox, A. J., & Cziferszky, A. (2008). Unlocking the time capsule of historic aerial photography to measure changes in Antarctic Peninsula glaciers. *The Photogrammetric Record*, 23(121), 51-68.
- Fryskowska, A. (2019). An improvement in the identification of the centres of checkerboard targets in point clouds using terrestrial laser scanning. *Sensors*, 19(4), 938.
- Gairns, C. (2008, January). Development of a semi-automated system for structural deformation monitoring using a reflectorless total station. In *Masters Abstracts International* (Vol. 48, No. 06).
- Glacier processes. *AntarcticGlaciers.org*. <https://www.antarctic-glaciers.org/glacier-processes/> (last accessed:9/11/2020).
- GML C++ camera calibration toolbox*. Лаборатория компьютерной графики и мультимедиа. Graphics and Media Lab. <https://graphics.cs.msu.ru/ru/node/909> (last accessed: 9/11/2020).
- Gordon, S., Lichti, D. D., Stewart, M. P., & Tsakiri, M. (2000, December). Metric performance of a high-resolution laser scanner. In *Videometrics and Optical Methods for 3D Shape Measurement* (Vol. 4309, pp. 174-184). International Society for Optics and Photonics.
- Gourdon, E. (1908). Geographie physique-glaciologie-petrographie des regions visitees par. Expedition Antarctique Francaise (1903-1905).
- Hagg, W. J., Braun, L. N., Uvarov, V. N., & Makarevich, K. G. (2004). A comparison of three methods of mass-balance determination in the Tuyuksu glacier region, Tien Shan, Central Asia. *Journal of Glaciology*, 50(171), 505-510.

- Hamid, N. F. A., Ahmad, A., Ma'arof, I., & Hashim, K. A. (2013, March). Accuracy assessment of calibrating high resolution digital camera. In *2013 IEEE 9th International Colloquium on Signal Processing and its Applications* (pp. 349-352). IEEE.
- Haug, T., Rolstad, C., Elvehøy, H., Jackson, M., & Maalen-Johansen, I. (2009). Geodetic mass balance of the western Svartisen ice cap, Norway, in the periods 1968–1985 and 1985–2002. *Annals of Glaciology*, *50*(50), 119-125.
- Hlotov, V., Hunina, A., & Yurkiv, M. (2017). Method for determining the focal length in a digital non-metric camera. *Geomatics, Landmanagement and Landscape*, (3), 71-81.
- Hlotov, V., Marusazh, K., & Siejka, Z. (2019, June). The Proposal of Determining the Focal Length of a Non-Metric Digital Camera for UAV. In *Abstract Collection Book "World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium"* (pp. 369)
- Hlotov, V., Marusazh, K., & Siejka, Z. (2019, September). The Proposal of Determining the Focal Length of a Non-Metric Digital Camera for UAV. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 603, No. 2, p. 022050). IOP Publishing.
- Hlotov, V., Marusazh, Kh (2019). Accuracy investigation of point clouds with Faro Focus 3D S120 terrestrial laser scanner. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, *90*, 41–49.
- Hlotov, V., Marusazh, Kh. (2019, September). Accuracy investigation of create points cloud with Faro Focus 3D S120 terrestrial laser scanner. In *9th international scientific-technical conference "Environmental Engineering, Photogrammetry, Geoinformatics – Modern Technologies and Development Perspectives"* (pp. 81-82).
- Höfle, B., & Pfeifer, N. (2007). Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, *62*(6), 415-433.

- Höfle, B., Vetter, M., Pfeifer, N., Mandlbürger, G., & Stötter, J. (2009). Water surface mapping from airborne laser scanning using signal intensity and elevation data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(12), 1635-1649.
- Ingensand, H. (2006, May). Metrological aspects in terrestrial laser-scanning technology. In *Proceedings of the 3rd IAG/12th FIG symposium, Baden, Austria* (Vol. 2224).
- Jaafar, H. A., Meng, X., & Sowter, A. (2018). Terrestrial laser scanner error quantification for the purpose of monitoring. *Survey Review*, 50(360), 232-248.
- Jiang, W. P., E, D. C., Zhan, B. W., & Liu, Y. W. (2009). New model of Antarctic plate motion and its analysis. *Chinese Journal of geophysics*, 52(1), 23-32.
- Kaasalainen, S., Jaakkola, A., Kaasalainen, M., Krooks, A., & Kukko, A. (2011). Analysis of incidence angle and distance effects on terrestrial laser scanner intensity: Search for correction methods. *Remote Sensing*, 3(10), 2207-2221.
- Kaasalainen, S., Vain, A., Krooks, A., & Kukko, A. (2009). Topographic and distance effects in laser scanner intensity correction. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 38(3/W8), 219-222.
- Karabork, H., Yildiz, F., Coskun, E., Yilmaz, H. M., & Yakar, M. (2004). Investigation of accuracy for digital elevation models generated with different methods in photogrammetry. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35, B3.
- Karpilo, R. D. J., & Ronald, D. (2009). Glacier monitoring techniques. *Young, R. and Norby, L., The Geological Society of America, Boulder, Colorado*, 141-162.
- Karušs, J., Lamsters, K., Chernov, A., Krievāns, M., & Ješkins, J. (2019). Subglacial topography and thickness of ice caps on the Argentine Islands. *Antarctic Science*, 31(6), 332-344.
- Kaser, G., Fountain, A., Jansson, P., Heucke, E., & Knaus, M. (2003). *A manual for monitoring the mass balance of mountain glaciers* (Vol. 137). Paris: Unesco.
- Kaufmann, V. (2012). The evolution of rock glacier monitoring using terrestrial photogrammetry: the example of Äusseres Hochebenkar rock glacier (Austria). *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105(2).

- Kaufmann, V., & Ladstädter, R. (2008). Application of terrestrial photogrammetry for glacier monitoring in Alpine environments. *Ele*, 2700(2800), 2900.
- Kaufmann, V., & Ladstädter, R. (2008, February). Documentation of the retreat of Gössnitzkees and Hornkees glaciers (Hohe Tauern Range, Austria) for the time period 1997–2006 by means of aerial photogrammetry. In *Mountain Mapping and Visualisation, Proceedings of the 6th ICA Mountain Cartography Workshop. Zürich*.
- Khosbayara, B., & Uranchimegb, R. T. Y. (2006). Estimation of glaciers and snow coverage in western part of Mongolia using Modis snow products. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, 1025-1026.
- Kienzle, S. W. (2004). The effect of grid cell size on major terrain derivatives. In *Proceedings of the Twenty-Fourth Annual ESRI User Conference*.
- Knoll, C., & Kerschner, H. (2009). A glacier inventory for South Tyrol, Italy, based on airborne laser-scanner data. *Annals of Glaciology*, 50(53), 46-52.
- Kopacik, A., & Korbosova, M. (2004). Optimal configuration of standpoints by application of laser terrestrial scanners. In *INGEO 2004 and Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying, Bratislava, Slovakia, November* (pp. 11-13).
- Kovalenok, S. B., Milinevsky, G. P., & Shanklin, J. D. (2004). Impact of Antarctic Peninsula climate change on Galindez Island ice cap dynamics. *Antarctic Peninsula Climate Variability: History, Causes and Impacts*, 16-18.
- Kovalenok, S. B., Milinevsky, G. P., Glotov, V. N., Tretjak, K. R., Chizhevsky, V. V., Greku, R. K., & Moskalevsky, M. Y. (2004). Small ice cap dynamic in the Antarctic Peninsula rapid climate change conditions. In *XXVIII SCAR Open Science Conference, Bremen* (pp. 216-217).
- Krimmel, R. M. (1989). Mass balance and volume of South Cascade Glacier, Washington 1958–1985. In *Glacier fluctuations and climatic change* (pp. 193-206). Springer, Dordrecht.

- Kukko, A., Kaasalainen, S., & Litkey, P. (2008). Effect of incidence angle on laser scanner intensity and surface data. *Applied optics*, 47(7), 986-992.
- Kunz, M., King, M. A., Mills, J. P., Miller, P. E., Fox, A. J., Vaughan, D. G., & Marsh, S. H. (2012). Multi-decadal glacier surface lowering in the Antarctic Peninsula. *Geophysical Research Letters*, 39(19).
- Kunz, M., Mills, J. P., Miller, P. E., King, M. A., Fox, A. J., & Marsh, S. (2012). Application of surface matching for improved measurements of historic glacier volume change in the Antarctic Peninsula. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci*, 39(8), 579-584.
- Kurczyński, Z. (2006). *Lotnicze i satelitarne obrazowanie Ziemi*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Laser scanner focus 3D S120. FARO technologies.*
<https://www.faro.in.ua/focus%20S120.html>
- Lee, H. (2007). Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Leica TCR 405*. Precision Geosystems, Inc. <https://www.precision-geosystems.com>
- Levashov, S. P., Yakymchuk, N. A., Usenko, V. P., Korchagin, I. N., Solovyov, V. D., & Pishchany, Y. M. (2004). Determination of the Galindez Island ice cap thickness by the vertical electric-resonance sounding method. *Ukrainian Antarctic Journal*, 2, 38-43.
- Lichti, D. D. (2007). Error modelling, calibration and analysis of an AM–CW terrestrial laser scanner system. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 61(5), 307-324.
- Lichti, D. D. (2008). A method to test differences between additional parameter sets with a case study in terrestrial laser scanner self-calibration stability analysis. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(2), 169-180.
- Lichti, D. D. (2009). The impact of angle parameterisation on terrestrial laser scanner self-calibration. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 38(3/W8), 171-176.
- Lichti, D. D. (2010). A review of geometric models and self-calibration methods for terrestrial laser scanners. *Boletim de ciências geodésicas*, 16(1).

- Lichti, D. D., & Licht, M. G. (2006). Experiences with terrestrial laser scanner modelling and accuracy assessment. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci*, 36(5), 155-160.
- Lichti, D. D., Gordon, S. J., & Tipdecho, T. (2005). Error models and propagation in directly georeferenced terrestrial laser scanner networks. *Journal of surveying engineering*, 131(4), 135-142.
- Lichti, D. D., Stewart, M. P., Tsakiri, M., & Snow, A. J. (2000). Benchmark tests on a three-dimensional laser scanning system. *Geomatics Research Australasia*, 1-24.
- Lichti, D., Brustle, S., & Franke, J. (2007). Self-calibration and analysis of the Surphaser 25HS 3D scanner. *Proceedings of the Strategic Integration of Surveying Services, FIG Working Week, Hong Kong, China*, 1317.
- Lichti, D.D. (2010). Terrestrial laser scanner self-calibration: correlation sources and their mitigation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 65 (1), 93-102.
- Lindenbergh, R., Pfeifer, N., & Rabbani, T. (2005, September). Accuracy analysis of the Leica HDS3000 and feasibility of tunnel deformation monitoring. In *Proceedings of the ISPRS Workshop, Laser scanning* (Vol. 36, p. 3).
- Maas, H. G., Schwalbe, E., Dietrich, R., Bäessler, M., & Ewert, H. (2008). Determination of spatio-temporal velocity fields on glaciers in West-Greenland by terrestrial image sequence analysis. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, 37(Part B8), 1419-1424.
- Maksymchuk, V., Kuznetsova, V., Chobotok, I., & Dotsenko, I. (2002). First results of tectonomagnetic investigation of akademik Vernadsky station. *Bulletin of Ukrainian Antarctic Center*, 4, 197-201.
- Marusazh, K. I., Hlotov, V. M., & Siejka, Z. (2019). Monitoring of glacier frontal parts on Galindez and Winter islands (the Argentine Islands) in 2018—2019. *Ukrainian Antarctic journal*, (2 (19)), 26-37.
- Mechelke, K., Kersten, T. P., & Lindstaedt, M. (2007). Comparative investigations into the accuracy behaviour of the new generation of terrestrial laser scanning systems. *Proc. in the Optical*, 3, 19-327.

- Mills, J. P., Buckley, S. J., Mitchell, H. L., Clarke, P. J., & Edwards, S. J. (2005). A geomatics data integration technique for coastal change monitoring. *Earth Surface Processes and Landforms: the Journal of the British Geomorphological Research Group*, 30(6), 651-664.
- Molnia, B. F. (2004). *Glossary of Glacier Terminology: A glossary providing the vocabulary necessary to understand the modern glacier environment* (No. 2004-1216). US Geological Survey.
- Moussavi, M. S., Zoej, M. V., Sahebi, M. R., & Rezaei, Y. (2008). Change detection of mountain glacier surface using aerial and satellite imagery: a case study in Iran, Alamchal Glacier. *Internat. Arch. Photogram. Remote Sens. Spatial Inform. Sci*, 37(4), 1013-1016.
- NASA: Global climate change. <https://climate.nasa.gov/> (last accessed: 9/11/2020).
- Noël, B., Berg, W. J. V. D., Wessem, J., Meijgaard, E. V., As, D. V., Lenaerts, J., ... & Broeke, M. R. (2018). Modelling the climate and surface mass balance of polar ice sheets using RACMO2–Part 1: Greenland (1958–2016). *The Cryosphere*, 12(3), 811-831.
- Oliva, M., Navarro, F., Hrbáček, F., Hernández, A., Nývlt, D., Pereira, P., ... & Trigo, R. (2017). Recent regional climate cooling on the Antarctic Peninsula and associated impacts on the cryosphere. *Science of the Total Environment*, 580, 210-223.
- Osmanoglu, B., Navarro, F. J., Hock, R., Braun, M., & Corcuera, M. I. (2014). Surface velocity and mass balance of Livingston Island ice cap, Antarctica. *The Cryosphere*, 8(5), 1807-1823.
- Paul, F., Bolch, T., Briggs, K., Kääb, A., McMillan, M., McNabb, R., ... & Wuite, J. (2017). Error sources and guidelines for quality assessment of glacier area, elevation change, and velocity products derived from satellite data in the Glaciers_cci project. *Remote Sensing of Environment*, 203, 256-275.
- Pellikka, P., & Rees, W. G. (Eds.). (2009). *Remote sensing of glaciers: techniques for topographic, spatial and thematic mapping of glaciers*. CRC press.

- Pérez, M., Agüera, F., & Carvajal, F. (2011). Digital camera calibration using images taken from an unmanned aerial vehicle. *International archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences*, 38(1/C22).
- Pesci, A., & Teza, G. (2008). Effects of surface irregularities on intensity data from laser scanning: an experimental approach. *Annals of Geophysics*.
- Pesci, A., Teza, G., & Bonali, E. (2011). Terrestrial laser scanner resolution: Numerical simulations and experiments on spatial sampling optimization. *Remote Sensing*, 3(1), 167-184.
- Pfeifer, N., & Briese, C. (2007, April). Laser scanning—principles and applications. In *GeoSiberia 2007-International Exhibition and Scientific Congress* (pp. cp-59). European Association of Geoscientists & Engineers.
- Pfeifer, N., Höfle, B., Briese, C., Rutzinger, M., & Haring, A. (2008). Analysis of the backscattered energy in terrestrial laser scanning data. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, 37, 1045-1052.
- Raphael, M. N., Marshall, G. J., Turner, J., Fogt, R. L., Schneider, D., Dixon, D. A., ... & Hobbs, W. R. (2016). The Amundsen Sea low: Variability, change, and impact on Antarctic climate. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(1), 111-121.
- Reshetyuk, Y. (2006). Calibration of terrestrial laser scanners Callidus 1.1, Leica HDS 3000 and Leica HDS 2500. *Survey Review*, 38(302), 703-713.
- Reshetyuk, Y. (2009). *Self-calibration and direct georeferencing in terrestrial laser scanning* (Doctoral dissertation, KTH).
- Rietdorf, A., Gielsdorf, F., & Gruendig, L. (2004, November). A concept for the calibration of terrestrial laser scanners. In *Proceedings of INGEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference of Engineering Surveying. Bratislava, Slovakia* (Vol. 11, p. 13).
- Rignot, E., Mouginot, J., Scheuchl, B., Van Den Broeke, M., Van Wessem, M. J., & Morlighem, M. (2019). Four decades of Antarctic Ice Sheet mass balance from 1979–2017. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(4), 1095-1103.
- Rodriguez, J. A. M. (Ed.). (2012). *Laser Scanner Technology*. BoD—Books on Demand.

- Rolstad, C., Haug, T., & Denby, B. (2009). Spatially integrated geodetic glacier mass balance and its uncertainty based on geostatistical analysis: application to the western Svartisen ice cap, Norway. *Journal of Glaciology*, 55(192), 666-680.
- Rosa, K. K., Vieira, R., Fernandez, G., Mendes Jr, C. W., ARIGONY-NETO, J., VELHO, L., & SIMÕES, J. (2015). Recent changes in the Wanda Glacier, King George Island, Antarctica. *Pesquisas em Geociências*, X-X.
- Rudiyi, R. M., Kyselov, Y. O., Domashenko, H. T., Kravets, O. Y., & Husar, K. D. (2020). Analysis of mountain relief for the causes of snow avalanches. *Journal of Geology, Geography and Geoecology*, 29 (4), 789-795.
- Sadler, I. (1968). Observations on the ice caps of Galindez and Skua Islands, Argentine Islands, 1960-66. *British Antarctic Survey Bulletin*, 17, 21-49.
- Sanjosé, J. J., & Lerma, J. L. (2004). Estimation of rock glacier dynamics by environmental modelling and automatic photogrammetric techniques. *ISPRS Arch*, 35, 905-909.
- Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J. H., & Irvine-Fynn, T. D. L. (2012). Studying glacial melt processes using sub-centimeter DEM extraction and digital close-range photogrammetry. *ISPRS Archives*, 39, 435-440.
- Schneider, D. (2009). Calibration of a Riegl LMS-Z420i based on a multi-station adjustment and a geometric model with additional parameters. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf*, 38, 177-182.
- Schoenung, S. M., & Albertson, R. T. (2011, April). Remote Sensing in the Arctic Using Autonomous Sensors Developed under NASA's Airborne Science Program for the International Polar Year. In *34th International Symposium on Remote Sensing of Environment* (p. 4).
- Schulz, T. (2008). *Calibration of a terrestrial laser scanner for engineering geodesy* (Vol. 96). ETH Zurich.
- Schulz, T., & Ingensand, H. (2004). Influencing variables, precision and accuracy of terrestrial laser scanners. *Intergeo East, Bratislava, Slovakia*.
- Schwalbe, E., Maas, H. G., Dietrich, R., & Ewert, H. (2008). Glacier velocity determination from multi temporal terrestrial long range laser scanner point

- clouds. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, 457-462.
- Shan, J., & Toth, C. K. (Eds.). (2018). *Topographic laser ranging and scanning: principles and processing*. CRC press.
- Shepherd, A., Gilbert, L., Muir, A. S., Konrad, H., McMillan, M., Slater, T., ... & Engdahl, M. E. (2019). Trends in Antarctic Ice Sheet elevation and mass. *Geophysical Research Letters*, 46(14), 8174-8183.
- Shepherd, A., Ivins, E. R., Geruo, A., Barletta, V. R., Bentley, M. J., Bettadpur, S., ... & Zwally, H. J. (2012). A reconciled estimate of ice-sheet mass balance. *Science*, 338(6111), 1183-1189.
- Silva, A. B., Arigony-Neto, J., Braun, M. H., Espinoza, J. M. A., Costi, J., & Jaña, R. (2020). Spatial and temporal analysis of changes in the glaciers of the Antarctic Peninsula. *Global and Planetary Change*, 184, 103079.
- Silva, A. B., Neto, J. A., Júnior, C. W. M., & Lemos, A. G. (2014). Variations in surface velocities of tidewater glaciers of the Antarctic peninsula between the periods 1988-1991 and 2000-2003. *Brazilian Journal of Geophysics*, 32(1), 49-60.
- Smith, S., & Brown, J. (2009). Assessment of the status of the development of the standards for the Terrestrial Essential Climate Variables-T7-Permafrost and seasonally frozen ground. In *Global Terrestrial Observing System GTOS-61*.
- Sobota, I., Kejna, M., & Arażny, A. (2015). Short-term mass changes and retreat of the Ecology and Sphinx glacier system, King George Island, Antarctic Peninsula. *Antarct. Sci*, 27(5), 500-510.
- Sokol, S., Liptak, M., & Bajtala, M. (2014). Influence of the Density of Source Data on a Volume Estimation Using DEM. *Inżynieria Mineralna*, 15(1), 39-45.
- Solbø, S., & Storvold, R. (2013). Mapping Svalbard glaciers with the cryowing UAS. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 1, W2.
- Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Menenti, M., & Teunissen, P. J. G. (2009). Incidence angle influence on the quality of terrestrial laser scanning points.

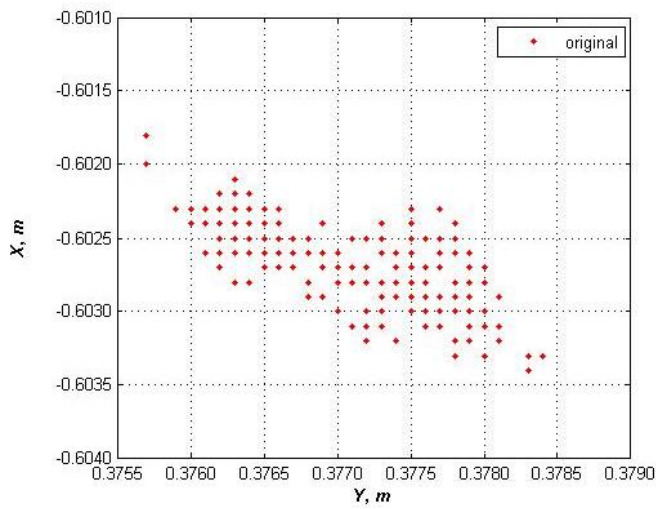
- In *Proceedings ISPRS Workshop Laserscanning 2009, 1-2 Sept 2009, Paris, France*. ISPRS.
- Soudarissanane, S., Lindenbergh, R., Menenti, M., & Teunissen, P. (2011). Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 66(4), 389-399.
- Staiger, R. (2003, December). Terrestrial laser scanning technology, systems and applications. In *2nd FIG Regional Conference Marrakech, Morocco* (Vol. 1, pp. 1-10).
- Staiger, R. (2005, April). The geometrical quality of terrestrial laser scanner (TLS). In *Proceedings of FIG Working Week* (pp. 1-11).
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M. M., Allen, S. K., Boschung, J., ... & Midgley, P. M. (2014). Climate Change 2013: The physical science basis. contribution of working group I to the fifth assessment report of IPCC the intergovernmental panel on climate change.
- Storvold, R. (2009). Scientific UAS Missions in the Polar Regions. *UAS Yearbook "UAS: The Global Perspective*, 132-133.
- Strategy, I. G. O. (2007). Cryosphere theme report: for the monitoring of our environment from space and from Earth. *Geneva, World Meteorological Organisation*.(WMO/TD-No. 1405.).
- Suchocki, C., & Katzer, J. (2016). An example of harnessing terrestrial laser scanner for remote sensing of saturation of chosen building materials. *Construction and building materials*, 122, 400-405.
- Sun, X., Liu, Y., Yu, X., Wu, H., & Zhang, N. (2017). Three-dimensional measurement for specular reflection surface based on reflection component separation and priority region filling theory. *Sensors*, 17(1), 215.
- Tan, K., & Cheng, X. (2015). Intensity data correction based on incidence angle and distance for terrestrial laser scanner. *Journal of Applied Remote Sensing*, 9(1), 094094.
- Tan, K., & Cheng, X. (2016). Correction of incidence angle and distance effects on TLS intensity data based on reference targets. *Remote Sensing*, 8(3), 251.

- Tan, K., & Cheng, X. (2017). Specular reflection effects elimination in terrestrial laser scanning intensity data using Phong model. *Remote Sensing*, 9(8), 853.
- Tan, K., Cheng, X., Ding, X., & Zhang, Q. (2015). Intensity data correction for the distance effect in terrestrial laser scanners. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(1), 304-312.
- Tan, K., Zhang, W., Shen, F., & Cheng, X. (2018). Investigation of TLS intensity data and distance measurement errors from target specular reflections. *Remote Sensing*, 10(7), 1077.
- Testing of laser scanning checkerboard targets. A comparison of targets. <https://www.laserscanning-europe.com/en/news/testing-laser-scanning-checkerboard-targets-comparison-targets> (last accessed: 9/11/2020).
- Thomas, E. R., & Tetzner, D. R. (2018). The climate of the Antarctic Peninsula during the twentieth century: evidence from ice cores. In *Antarctica-A Key To Global Change*. IntechOpen.
- Thomas, E. R., Van Wessem, J. M., Roberts, J., Isaksson, E., Schlosser, E., Fudge, T. J., ... & Ekaykin, A. A. (2017). Regional Antarctic snow accumulation over the past 1000 years. *Climate of the Past*, 13(11), 1491-1513.
- Thomas, R. H. (1963). Studies on the ice cap of Galindez Island, Argentine Islands. *British Antarctic Survey Bulletin*, 2, 27-43.
- Thomson, J. W., & Harris, J. S. (1981). Southern Graham Land: Geological Map. *British Antarctic Survey, 500G Series, sheet, 3*.
- Tiana, B., Lia, Z., & Zhua, Y. (2011). Terrain correction of polarimetric SAR data and its application in mapping mountain glacier facies with RADARSAT-2 SAR. In *ISPRS Hannover Workshop 2011: High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information, 14.-17. June, 2011, Hannover, Germany, XXXVIII* (Vol. 9, No. 6).
- Tretyak, K., Hlotov, V., Holubinka, Y., & Marusazh, K. (2016). Complex geodetic research in Ukrainian Antarctic station “Academician Vernadsky”(years 2002-2005, 2013-2014). *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 100(1), 149-163.

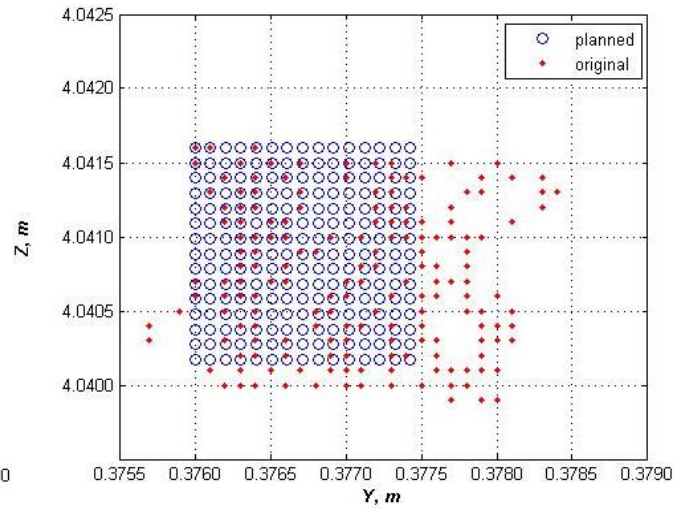
- Triglav-Čekada, M., & Zorn, M. (2013). Measuring small glaciers in Slovenia: connecting geodetic measurements and non-metric imagery for glacier measurements. *GIM International*, 27(5), 24-27.
- Turner, J., Barrand, N. E., Bracegirdle, T. J., Convey, P., Hodgson, D. A., Jarvis, M., ... & Klepikov, A. (2014). Antarctic climate change and the environment: an update. *Polar Record*, 50(3), 237-259.
- Turner, J., Lu, H., White, I., King, J. C., Phillips, T., Hosking, J. S., ... & Deb, P. (2016). Absence of 21st century warming on Antarctic Peninsula consistent with natural variability. *Nature*, 535(7612), 411-415.
- User Manual for the Focus3D 20/120 and S 20/120. https://knowledge.faro.com/Hardware/3D_Scanners/Focus/User_Manual_for_the_Focus3D_20-120_and_S_20-120 (last accessed: 9/11/2020).
- USGS (U.S. Geological Survey). <https://www.usgs.gov/> (last accessed: 9/11/2020).
- van Ree, J. M., & Fugro–Inpark, B. V. (2006). Determination of the precision and reliability parameters of terrestrial laser scanners. Delft: graduation thesis University of Technology Delft.
- Voegtle, T., & Wakaluk, S. (2009). Effects on the measurements of the terrestrial laser scanner HDS 6000 (Leica) caused by different object materials. *Proceedings of ISPRS work*, 38(2009), 68-74.
- Voegtle, T., Schwab, I., & Landes, T. (2008, July). Influences of different materials on the measurements of a terrestrial laser scanner (TLS). In *Proc. of the XXI Congress, The International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, ISPRS2008* (Vol. 37, pp. 1061-1066).
- Wang, Y., Thomas, E. R., Hou, S., Huai, B., Wu, S., Sun, W., ... & Zhang, Y. (2017). Snow accumulation variability over the West Antarctic Ice Sheet since 1900: A comparison of ice core records with ERA-20C reanalysis. *Geophysical Research Letters*, 44(22), 11-482.
- Wessem, J. M. V., Berg, W. J. V. D., Noël, B. P., Meijgaard, E. V., Amory, C., Birnbaum, G., ... & Broeke, M. R. (2018). Modelling the climate and surface mass

- balance of polar ice sheets using RACMO2–Part 2: Antarctica (1979–2016). *The Cryosphere*, 12(4), 1479-1498.
- Whitehead, K., Moorman, B., Wainstein, P., & Habib, A. (2010). Monitoring rapidly evolving landscape features using ground-based time-lapse photography: a case study for a Proglacial Icing. In *Canadian Geomatics Conference*.
- Wiggenhagen, M. (2002). Calibration of digital consumer cameras for photogrammetric applications. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 34(3/B), 301-304.
- Winkler, M., Pfeffer, W. T., & Hanke, K. (2012, July). Kilimanjaro ice cliff monitoring with close range photogrammetry. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXII ISPRS Congress* (Vol. 25, pp. 441-446).
- Wouters, B., Martín-Español, A., Helm, V., Flament, T., van Wessem, J. M., Ligtenberg, S. R., ... & Bamber, J. L. (2015). Dynamic thinning of glaciers on the Southern Antarctic Peninsula. *Science*, 348(6237), 899-903.
- Wu, H., Zhang, Y., Zhang, J., Lu, Z., & Zhong, W. (2012). Monitoring of glacial change in the head of the Yangtze River from 1997 to 2007 using InSAR technique. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 39, 411-415.
- Wujanz, D., Burger, M., Mettenleiter, M., & Neitzel, F. (2017). An intensity-based stochastic model for terrestrial laser scanners. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 125, 146-155.
- Yan, W. Y., Shaker, A., & El-Ashmawy, N. (2015). Urban land cover classification using airborne LiDAR data: A review. *Remote Sensing of Environment*, 158, 295-310.
- Yanalak, M. (2005). Computing pit excavation volume. *Journal of surveying engineering*, 131(1), 15-19.
- Zanutta, A., Negusini, M., Vittuari, L., Martelli, L., Cianfarra, P., Salvini, F., ... & Capra, A. (2018). New Geodetic and Gravimetric Maps to Infer Geodynamics of Antarctica with Insights on Victoria Land. *Remote Sensing*, 10(10), 1608.

- Zhang, W., Jiang, T., & Han, M. (2010, October). Digital camera calibration method based on PhotoModeler. In *2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing* (Vol. 3, pp. 1235-1238). IEEE.
- Zhang, Y., Wu, H., Jin, S., & Wang, H. (2013). Monitoring of glacier volume variation from multi-source data over Geladandong area. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 199-203.
- Zhou, C., Dongchen, E., Wang, Z., & Sun, J. (2008). Remote sensing application in Antarctic inland areas. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci*, 37, 819-824.
- Zogg, H. M. (2008). *Investigations of high precision terrestrial laser scanning with emphasis on the development of a robust close-range 3D-laser scanning system* (Doctoral dissertation, ETH Zurich).
- Züblin, M., Fischer, L., & Eisenbeiss, H. (2008). Combining photogrammetry and laser scanning for DEM generation in steep high-mountain areas. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37(B6b), 37-43.

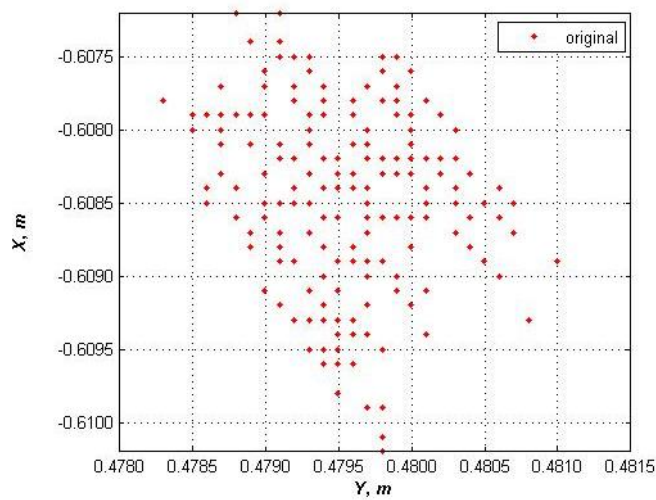


а)

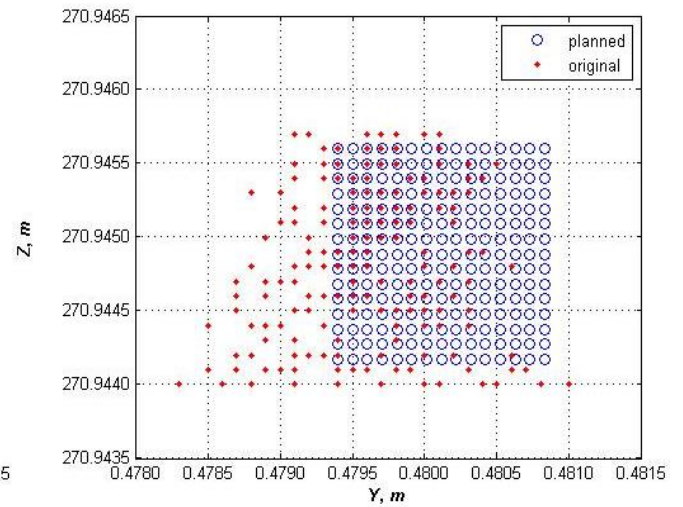


б)

Рис.1 Розподіл центрального фрагменту хмари точок білої сторони марки в площинах YX (а) та YZ (б) для віддалі сканування 0,6 м

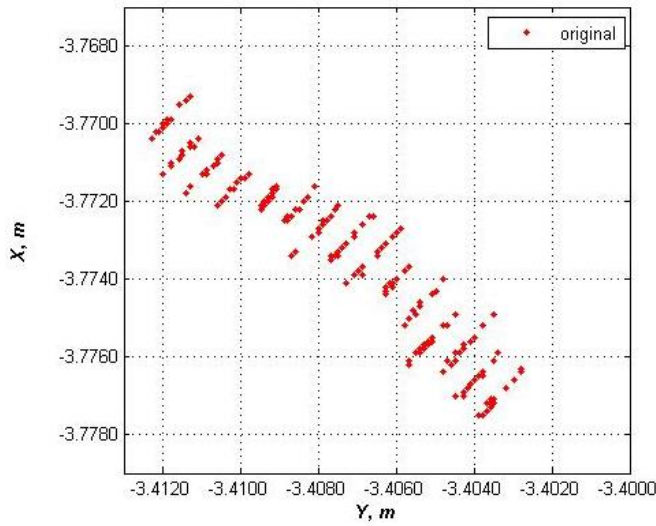


а)

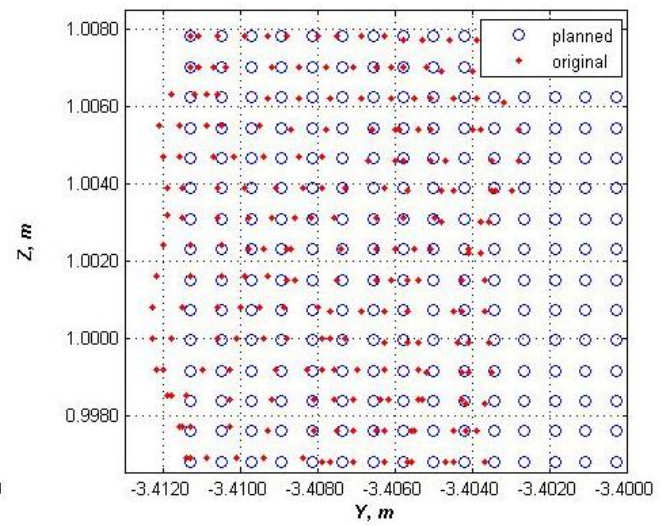


б)

Рис.2 Розподіл центрального фрагменту хмари точок чорної сторони марки в площинах YX (а) та YZ (б) для віддалі сканування 0,6 м

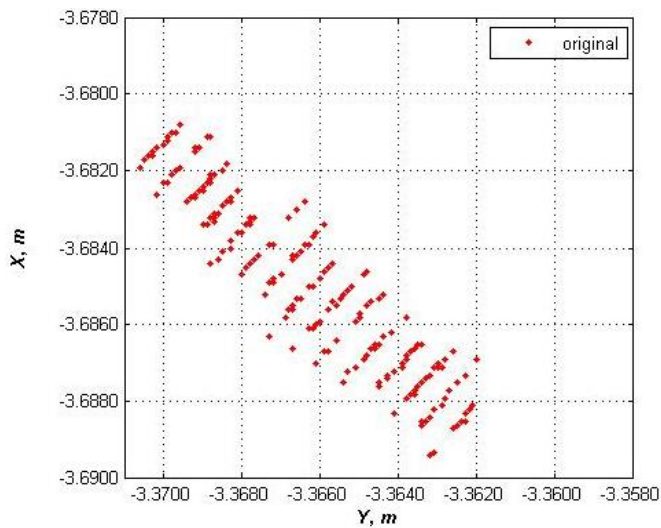


a)

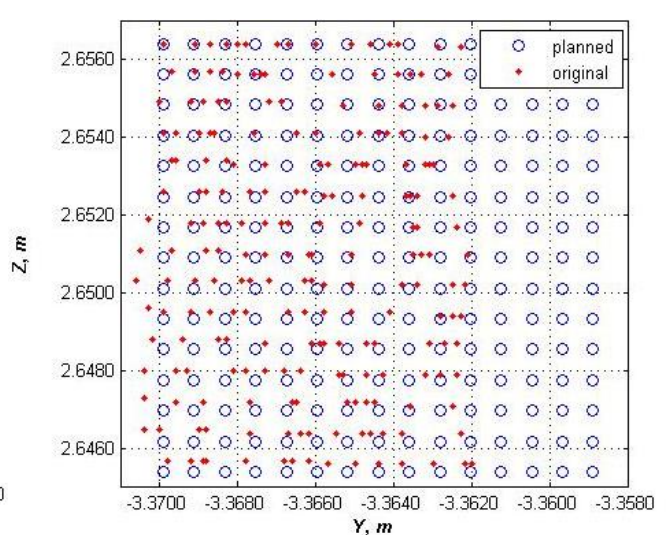


б)

Рис.3 Розподіл центрального фрагменту хмари точок білої сторони марки в площинах YX (a) та YZ (б) для віддалі сканування 5 м

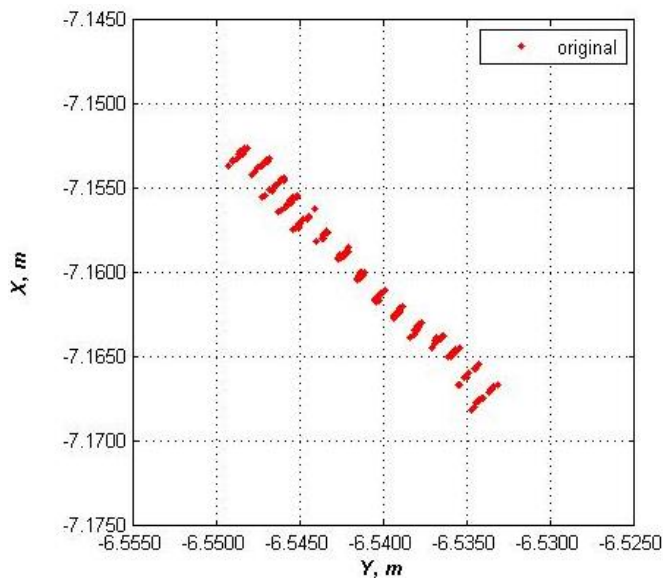


a)

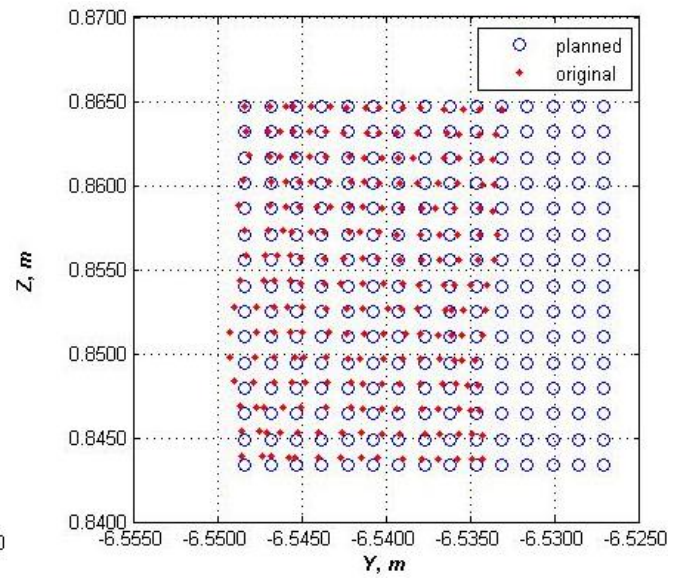


б)

Рис.4 Розподіл центрального фрагменту хмари точок чорної сторони марки в площинах YX (a) та YZ (б) для віддалі сканування 5 м

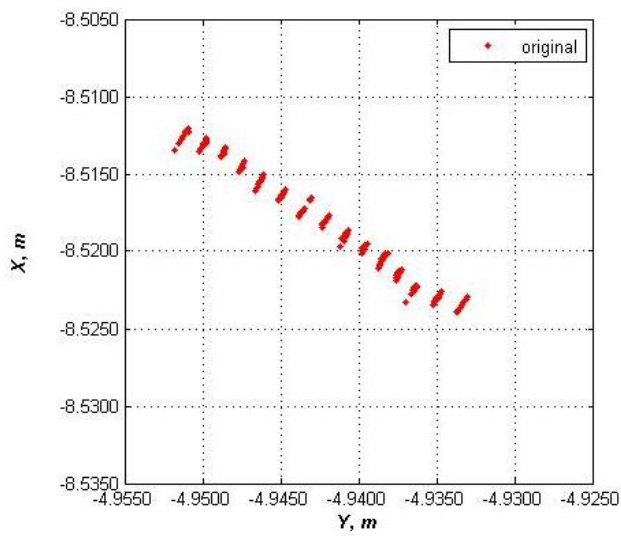


a)

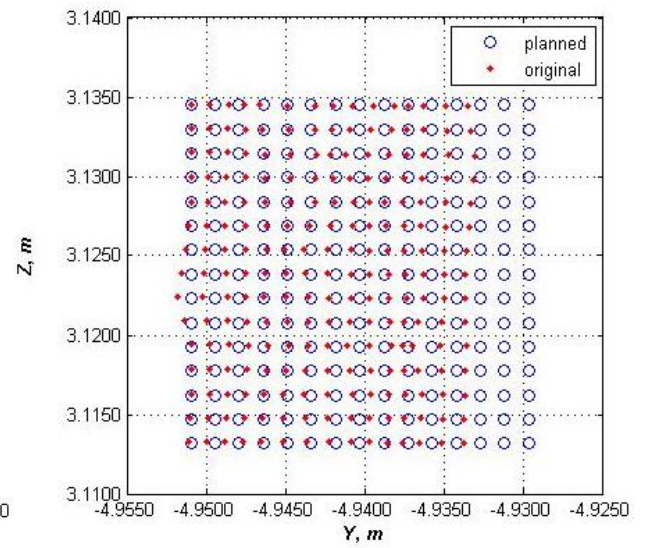


б)

Рис.5 Розподіл центрального фрагменту хмари точок білої сторони марки в площинах YX (а) та YZ (б) для віддалі сканування 10 м



a)



б)

Рис.6 Розподіл центрального фрагменту хмари точок чорної сторони марки в площинах YX (а) та YZ (б) для віддалі сканування 10 м

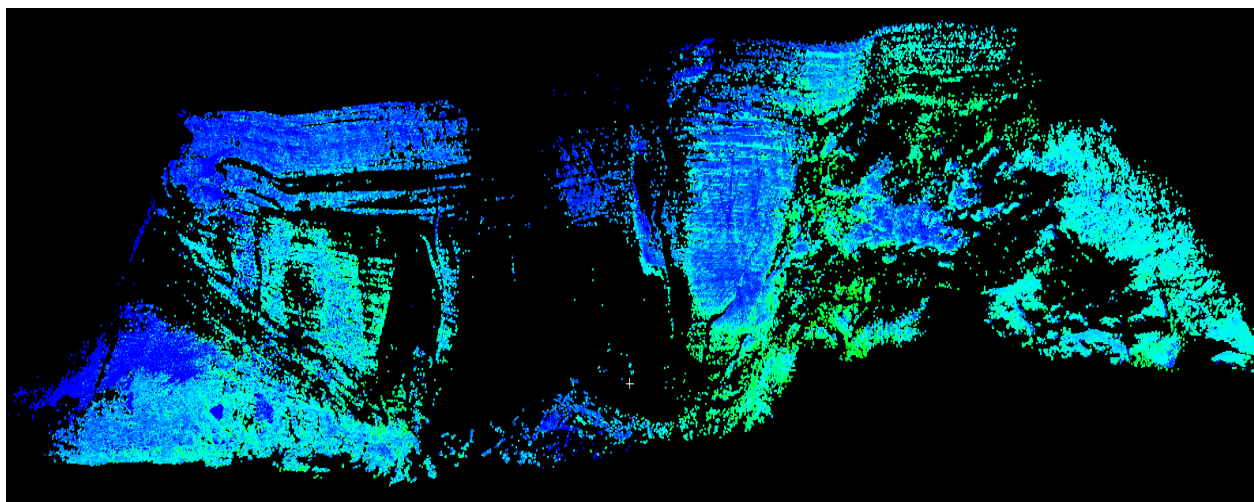


Рис. 1. Точкова модель південної частини льодовика о. Галіндез (2013 р.)



Рис. 2. Точкова модель південної частини льодовика о. Галіндез (2018 р.)

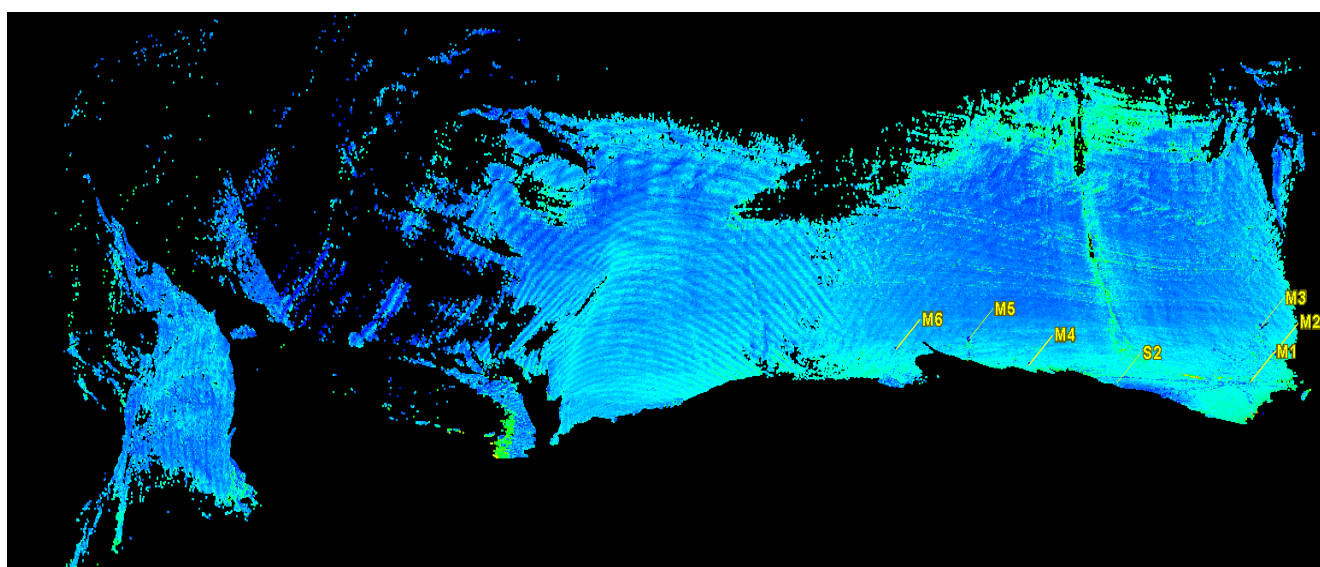


Рис. 3. Точкова модель південної частини льодовика о. Галіндез (2013 р.)



Рис. 4. Точкова модель південної частини льодовика о. Галіндез (2018 р.)

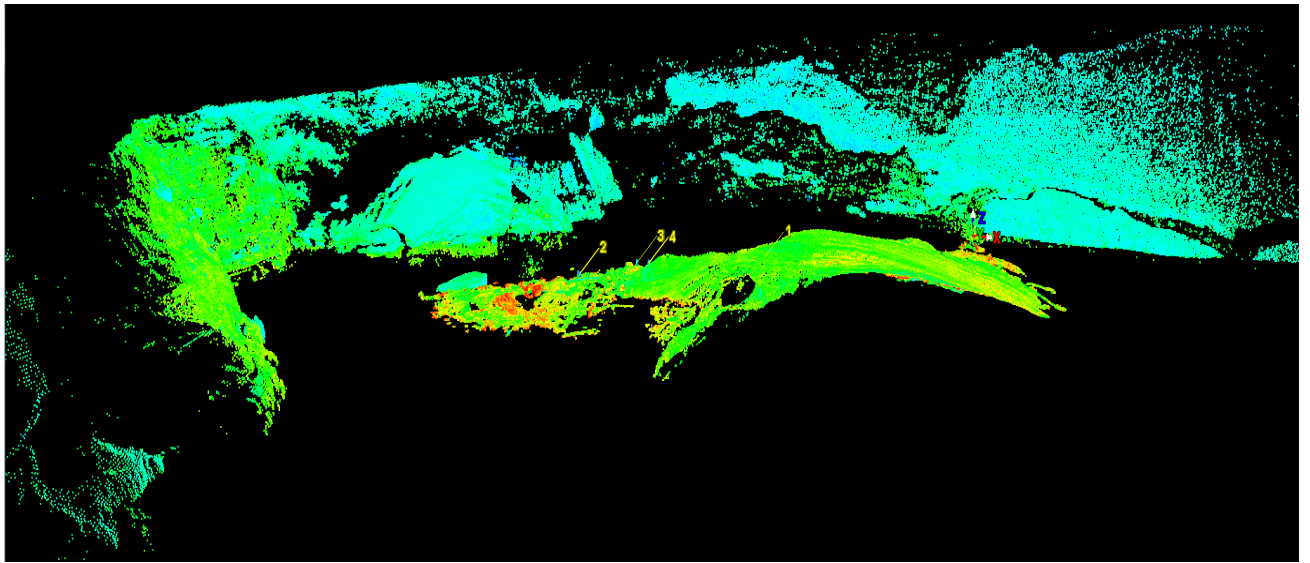


Рис. 5. Точкова модель південної частини льодовика о. Галіндез (2013 р.)



Рис. 6. Точкова модель південної частини льодовика о. Вінтер (2018 р.)



а) знімання 2002 р.



б) знімання 2003 р.



в) знімання 2004 р.



г) знімання 2005 р.



д) знімання 2013 р.



е) знімання 2014 р.



е) знімання 2019 р.

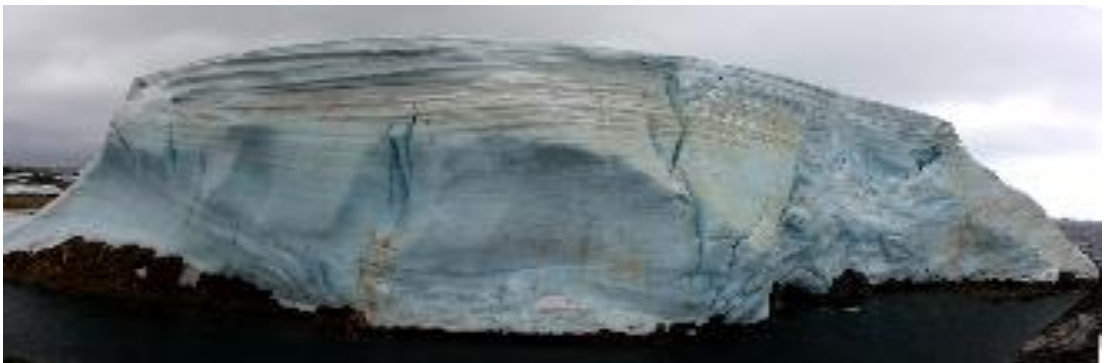
Рис. 1. Знімки західної сторони о. Галіндез за 2002 - 2019 роки



а) знімання 2004 р.



в) знімання 2005 р.



г) знімання 2013 р.



д) знімання 2014 р.



д) знімання 2019 р.

Рис.2. Знімки південної сторони льодовика на о. Галіндез за 2003-2019рр.



а) знімання 2004 р



б) знімання 2005 р



в) знімання 2013 р



г) знімання 2014 р



г) знімання 2019 р

Рис. 3. Знімки південної сторони о. Вінтер за 2004 -2019 роки



УКРАЇНА
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНА УСТАНОВА
НАЦІОНАЛЬНИЙ АНТАРКТИЧНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР

01601, м. Київ, бульв. Тараса Шевченка, 16, тел/факс: (380 44) 246-38-80, E-mail: uac@uac.gov.ua www.uac.gov.ua

24.02.2020р. № 45

На № _____

Ректору
Національного університету
«Львівська політехніка»
проф. д.т.н. Бобалу Ю. Я.

Державна установа Національний антарктичний науковий центр МОН України, підтверджує, що результати дисертаційної роботи Марусаж Христини Іванівни на тему «Розробка методики комплексного дослідження змін поверхневих об'ємів острівних льодовиків Антарктичного узбережжя» представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.24.01 – Геодезія, фотограмметрія та картографія використано під час виконання науково-технічної роботи «Створення комплексного геофізичного та геодезичного полігона в районі станції «Академік Вернадський» з використанням глобальних навігаційних супутникових систем і методів дистанційного зондування» за договором № 11/3-2015 від 20.10.2015 р. (державна реєстрація №0115U006716) 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 01.08.2019 р.

Отримані Марусаж Х.І. результати досліджень мають важливе наукове та практичне значення, зокрема, для ДУ Національний антарктичний науковий центр виконано опрацювання цифрових зображень, даних наземного лазерного сканування та геодезичних вимірювань льодовиків на островах Галіндез та Вінтер. Також побудовано 3D моделі поверхонь острівних льодовиків,

визначено зміни поверхневих об'ємів льодовиків, встановлено закономірності змін об'ємів льодовиків з метеорологічними та гляціологічними параметрами, виконано аналіз результатів моніторингу льодовиків.

Для визначення змін поверхневих об'ємів островних льодовиків Галіндез та Вінтер запропонована методика сумісного застосування методів наземного цифрового знімання та наземного лазерного сканування, що дає змогу істотно підвищити швидкість виконання вимірювань та точність отримання кількісних параметрів поверхонь льодовиків.

Директор Державної установи
Національний антарктичний
науковий центр МОН України



Дикий Є.О.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор Державної установи
Національний антарктичний
науковий центр МОН України
Дикий Є.О.

« _____ » 2020 р.

АКТ

впровадження методики комплексного дослідження змін поверхневих об'ємів
острівних льодовиків Антарктичного узбережжя

Державна установа Національний антарктичний науковий центр МОН України (далі – ДУ НАНЦ), підтверджує, що результати дисертаційної роботи Марусаж Христини Іванівни на тему «Розробка методики комплексного дослідження змін поверхневих об'ємів острівних льодовиків Антарктичного узбережжя», представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.24.01 – Геодезія, фотограмметрія та картографія використано під час виконання науково-технічної роботи «Створення комплексного геофізичного та геодезичного полігона в районі станції «Академік Вернадський» з використанням глобальних навігаційних супутникових систем і методів дистанційного зондування» за договором № Н/З-2015 від 20.10.2015 р. (державна реєстрація №0115U006716) 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 01.08.2019 р.

Отримані Марусаж Х.І. результати досліджень мають важливе наукове та практичне значення, зокрема для реалізації заходів 1 та 5 завдання 1 Державної цільової науково-технічної програми проведення досліджень в Антарктиці на 2011-2020 роки, затвердженої постановою Кабінету Міністрів України від 03 листопада 2010 р. № 1002. Марусаж Х.І. виконано опрацювання цифрових зображень, даних наземного лазерного сканування та геодезичних вимірювань льодовиків на островах Галіндез та Вінтер, отриманих в українських антарктичних експедиціях на антарктичну станцію «Академік Вернадський». Також побудовано 3D моделі поверхонь острівних льодовиків, визначено зміни їх поверхневих об'ємів, виконано аналіз результатів моніторингу льодовиків та закономірностей між змінами об'ємів льодовиків та метеорологічними та гляціологічними параметрами.

Для визначення змін поверхневих об'ємів острівних льодовиків Галіндез та Вінтер запропонована методика сумісного застосування методів наземного цифрового знімання та наземного лазерного сканування, що дає змогу істотно підвищити швидкість виконання вимірювань та точність отримання кількісних параметрів поверхонь льодовиків.

Заступник директора з наукових питань
ДУ НАНЦ, доктор біологічних наук, доцент



Козерецька І. А.