

УДК 528.073

ЗНАЧЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ОБ'ЄМІВ ОСТРІВНИХ ЛЬОДОВИКІВ АНТАРКТИЧНОГО УЗБЕРЕЖЖЯ ЯК ПОКАЗНИК ЗМІНИ КЛІМАТИЧНИХ УМОВ

К.Р. Третяк, В.М. Глотов, Ю.І. Голубінка

*Національний університет «Львівська політехніка», Україна, м. Львів, вул. С. Бандери, 12,
79013, kornel@lp.edu.ua, volodymmail@mail.ru, golubinka@lp.edu.ua*

У статті наводяться результати визначення поверхневих об'ємів острівних льодовиків Аргентинського архіпелагу Антарктичного узбережжя з використанням методу наземного лазерного сканування та цифрової стереофотограмметричної зйомки.

Значения поверхностных объёмов островных ледников Антарктического побережья как показатель изменения климатических условий.

К.Р. Третяк, В.М. Глотов, Ю.И. Голубинка

Реферат. В статье приводятся результаты определения поверхностных объёмов островных ледников Аргентинского архипелага Антарктического побережья с использованием метода наземного лазерного сканирования и цифровой стереофотограмметрической съёмки.

The importance of surfactant volumes of islands glaciers of Antarctic coast like climate changes indicator.

K.R. Tretiak, V.M. Hlotov, Yu.I. Holubinka

Abstract. In this article the results of volumes determination of islands glaciers of Argentinian archipelago (West Antarctic) are shown. For this purpose two methods were used: ground laser scanning and digital photogrammetry measurements.

Key words: glacier, ground laser scanning, digital photogrammetric measurements.

1. Вступ

На початку 2013 року розпочалася 18 Українська антарктична експедиція, у сезонному складі якої взяли участь автори цієї публікації. Перед нами було поставлено ряд завдань, одне з яких – визначити поверхневі об'єми острівних льодовиків. Це завдання вже стало традиційним, оскільки автори протягом кількох сезонних експедицій (2002–2005 рр.) здійснювали дослідження льодовиків, розташованих у районі Української антарктичної станції Академік Вернадський [1, 2, 3].

2. Результати попередніх досліджень

Перші (1900 р.) гляціологічні дослідження на території Антарктичного півострова (льодовиків затоки Фландрії) здійснював польський метеоролог Генрік Арцтовський. У 1908 р. гляціологічні дослідження проводили на льодовиках островів Петерманн та Бут Аргентинського архіпелагу учасники експедиції Шарко [8].

Протягом 1935-1936 рр. вчені Британської антарктичної експедиції здійснили метеорологічні вимірювання регіону Аргентинських островів, а також гляціологічні дослідження західного узбережжя Землі Грейама [9]. За результатами цих спостережень було встановлено, що прибережні льодовики походять від крижаного купола, який нині

зменшився до кількох невеликих шельфових льодовиків. Фотографії західної частини льодовика о-ва Галіндез подано на рис. 1.



Рис. 1. Фото західної частини льодовика о-ва Галіндез: а – 1935 р., б – лютий 1936 р. [9]

Починаючи з 1960 р., на території одного з найбільших островів Аргентинського архіпелагу – о-ві Галіндез англійські вчені здійснювали детальні гляціологічні дослідження [10], на основі яких визначався баланс мас льодовиків, вимірювались напрями їхніх рухів, температури снігового покриву, визначалися джерела акумуляції та фактори, що призводять до абляції льодовикових мас.

У роботі [10] зазначається, що джерелами накопичення льодовикових мас були снігові наноси, опади, а також вплив сублімації. Основними чинниками абляції визначають вітрову та дрейфову ерозії, танення снігової поверхні й танення криги в скелях.

Гляціологічні дослідження льодовиків Аргентинських островів було продовжено під час британських антарктичних експедицій в 1964–1966 рр. Зокрема, на островах Галіндез і Скуа (рис. 2, 3), де крига покриває відповідно 40 і 50 відсотків їх загальної площі, виконувались періодичні виміри товщини снігового покриву, величини абляції снігу та рухів льодовиків [11].

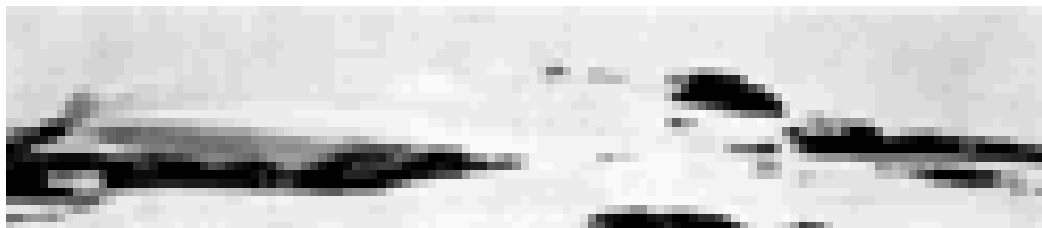


Рис. 2. Панорама льодовика о. Галіндез, 1966 р. [11]

Дослідження на о-ві Галіндез показали: для трьох частин льодовика була накопичена приблизно однакова кількість сніжної маси, тобто накопичення снігу істотно не змінюється з висотою над рівнем моря.

Результати вимірювань свідчать про те, що більша частина льодовикового куполу о-ва Галіндез зазнає незначних рухів. У той же час подальші дослідження в зонах максимальних зміщень дали можливість оцінити середньорічні зменшення льодовика на 9 см водного еквіваленту. Ця величина є лише часткою повного руйнування льодовика, оскільки інша частина абляції складалася в основному зі стоків і дрейфу неуцільненого снігу.



Рис. 3. Панорама льодовика о. Вінтер, 1966 р. [11]

Однією з можливих причин зміщень льодовика вважається ослаблення основної маси криги за рахунок пластичної деформації. В результаті процес ковзання нижньої поверхні льодовика відбувається по тріщинуватій поверхні корінних порід з неоднорідною швидкістю, внаслідок чого в тілі льодовика з'являються великі тріщини. Розташовані під прямим кутом до напрямку руху льодовика, ці тріщини розбивають його на блоки, близькі до прямокутної форми. [11].

Однак постає питання: чим обумовлена необхідність спостережень за рухом, деформаціями та геометричними параметрами острівних льодовиків? Як з'ясували гляціологи, острівні льодовики дуже чуйно реагують на зміну навколишньої температури і фактично є «лакмусовим папірцем», з допомогою якого можливо робити об'єктивні прогнози щодо зміни клімату не тільки в даному регіоні, а й на поверхні всієї планети [4]. Практично за останні 50 років 244 льодовики, розташовані на західному узбережжі Антарктичного півострова, зменшилися в розмірах. І, як свідчать результати спостережень протягом 1956–2004 рр., значно зменшився в розмірах і льодовик о-ва Галіндез (рис. 4).

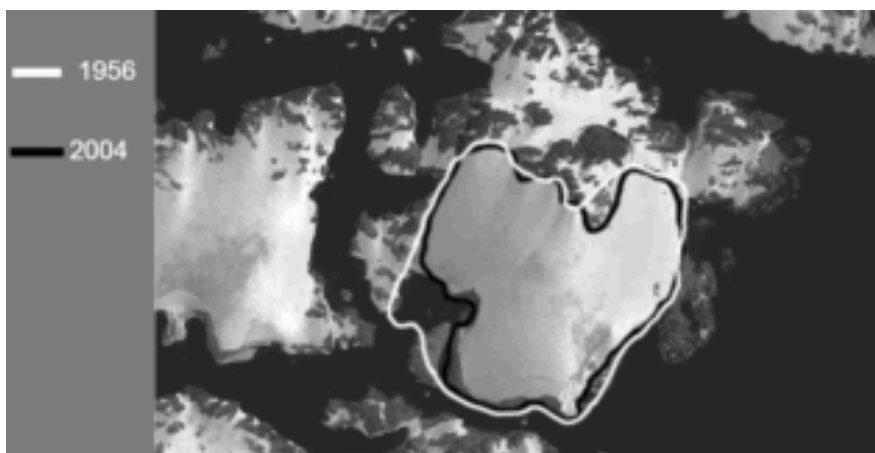


Рис. 4. Межі льодовика о-ва Галіндез у 1956 та 2004 рр.

Отже, як бачимо, завдання є досить важливим. Однак контактними методами реалізувати його досить важко, адже в більшості випадків досліджувати треба недоступні виходи льодовиків (ці території в основному й цікавлять гляціологів) [2].

Ось чому й було запропоновано технологічну схему сукупного використання цифрової стереофотограмметричної зйомки та наземного лазерного сканування поверхні льодовиків.

3. Априорна оцінка точності визначення приповерхневих об'ємів

Для визначення можливості застосування вищезначеного методу потрібно було наперед визначити априорну оцінку точності обчислення координат точок досліджуваних об'єктів та точність визначення поверхневих об'ємів. При цьому дуже важливо врахувати всі елементи, що впливають на точність визначення координат. Скористаємося формулами для загального випадку зйомки ($\alpha = \omega = \kappa \leq 3^\circ - 5^\circ$). Тоді середні квадратичні похибки будуть [2]:

$$\left. \begin{aligned}
 m_{X_\phi} &= x_n \cdot m \left[\frac{m_B^2}{B^2} + \frac{m_{x_n}^2}{x_n^2} + \frac{Y_\phi^2 \cdot m_p^2}{(B \cdot f)^2} + \left(\frac{f^2 + x_n^2}{f \cdot x_n} \right)^2 m_{\alpha_n}^2 + \left(\frac{z_n}{f} \right)^2 m_{\omega_n}^2 + \left(\frac{z_n}{x_n} \right)^2 m_{\kappa_n}^2 + \left(\frac{Y_\phi}{B} \right)^2 m_{\Delta\alpha}^2 + \right. \\
 &\quad \left. + \left(\frac{Y_\phi \cdot x_n^2}{B \cdot f^2} \right)^2 m_{\Delta\alpha}^2 + \left(\frac{Y_\phi \cdot x_n \cdot z_n}{B \cdot f^2} \right)^2 m_{\Delta\omega}^2 + \left(\frac{Y_\phi \cdot z_n}{B \cdot f} \right)^2 m_{\Delta\kappa}^2 \right]^{1/2} \\
 m_{Y_\phi} &= f \cdot m \left[\frac{m_B^2}{B^2} + \frac{m_f^2}{f^2} + \frac{Y_\phi^2 \cdot m_p^2}{(B \cdot f)^2} + \left(\frac{Y_\phi}{B \cdot f} \right)^2 m_{\Delta\alpha}^2 + \left(\frac{Y_\phi \cdot x_n^2}{B \cdot f^2} \right)^2 m_{\Delta\alpha}^2 + \left(\frac{Y_\phi \cdot x_n \cdot z_n}{B \cdot f^2} \right)^2 m_{\Delta\omega}^2 + \right. \\
 &\quad \left. + \left(\frac{Y_\phi \cdot z_n}{B \cdot f} \right)^2 m_{\Delta\kappa}^2 \right]^{1/2} \\
 m_{Z_\phi} &= z_n \cdot m \left[\frac{m_B^2}{B^2} + \frac{m_{z_n}^2}{z_n^2} + \frac{Y_\phi^2 \cdot m_p^2}{(B \cdot f)^2} + \left(\frac{x_n}{f} \right)^2 m_{\alpha_n}^2 + \left(\frac{f^2 + z_n^2}{f \cdot z_n} \right)^2 m_{\omega_n}^2 + \left(\frac{x_n}{z_n} \right)^2 m_{\kappa_n}^2 + \right. \\
 &\quad \left. + \left(\frac{Y_\phi \cdot f}{z_n \cdot B \cdot f} \right)^2 m_{\Delta\alpha}^2 + \left(\frac{Y_\phi \cdot x_n^2}{B \cdot f^2 \cdot z_n} \right)^2 m_{\Delta\alpha}^2 + \left(\frac{Y_\phi \cdot x_n}{B \cdot f^2} \right)^2 m_{\Delta\omega}^2 + \left(\frac{Y_\phi}{B \cdot f} \right)^2 m_{\Delta\kappa}^2 \right]^{1/2}
 \end{aligned} \right\} (1)$$

де X_ϕ, Y_ϕ – фотограмметричні координати точки масиву; B – довжина бази зйомки; 0,70 м водного еквівалента на рік f – фокусна відстань камери; $x_{n,n}, z_{n,n}$ – виміряні координати на знімках; m – знаменник масштабу зйомки; m_B – похибка виміру бази; m_x, m_z – похибка виміру координат на знімку; m_{α} – похибка виміру горизонтального паралаксу; m_f – похибка виміру фокусної відстані; $m_{\alpha}, m_{\omega}, m_{\kappa}$ – похибки кутових елементів зовнішнього орієнтування знімальної камери; $m_{\Delta\alpha}, m_{\Delta\omega}, m_{\Delta\kappa}$ – залишкові похибки визначення кутових елементів зовнішнього орієнтування знімків.

У таблиці 1 наведено значення похибок $m_{X_\phi}, m_{Y_\phi}, m_{Z_\phi}$ для цифрової камери Canon EOS450D:

$$x_n = 22,2 \text{ мм}, z_n = 14,8 \text{ мм}, m_B = 5 \text{ мм}, m_p = m_x = m_z = 0,005 \text{ мм}, m_{\Delta\alpha} = m_{\Delta\omega} = m_{\Delta\kappa} = 3''$$

Таблиця 1

Априорна оцінка точності фотограмметричних координат при загальному випадку зйомки ($\alpha = \omega = \kappa \leq 3^\circ - 5^\circ$)

Значення середніх квадратичних похибок	Y_ϕ (м)	Canon EOS 450D ($l_x = 22,2 \text{ мм}, l_z = 14,8 \text{ мм}$)		
		$x_n = 10 \text{ мм}, z_n = 7 \text{ мм}$		
		$f=18 \text{ мм}$	$f=35 \text{ мм}$	$f=55 \text{ мм}$
m_{X_ϕ} (мм)	200	58,7	30,2	19,3
m_{Y_ϕ} (мм)	200	87,4	49,8	37,1
m_{Z_ϕ} (мм)	200	56,5	29,2	18,7

4. Априорна оцінка точності визначення просторових координат об'єктів при наземному лазерному скануванні (НЛС)

Похибка вимірів, отриманих із результатів НЛС, визначається формулою:

$$m_{лз} = \sqrt{m_{нв}^2 + m_{мп}^2}, \quad (2)$$

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

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

$$m_{лз} = \sqrt{m_{осн.лев}^2 + m_{роб.лев}^2 + m_{ор.}^2 + m_{вим.}^2}, \quad (3)$$

де: $m_{осн.лев}$ і $m_{роб.лев}$ – похибки створення основного і робочого планово-висотного положення сканування – сумарна похибка ≤ 10 мм; $m_{ор.}$ – похибка зовнішнього орієнтування сканів, $m_{ор.} \leq 5$ мм; $m_{вим.}$ – похибка вимірів.

Згідно з технічними характеристиками сканера FARO Laser Scanner Focus3D, $m_{вим.} = 2$ мм. Отже, за формулою отримаємо: $m_{лз} = 11,4$ мм.

Априорна оцінка точності визначення об'ємів способом горизонтальної сітки

Для оцінки точності визначення об'ємів продиференціюємо формулу [2]. Отримаємо:

$$m_{лз} = \sqrt{m_{осн.лев}^2 + m_{роб.лев}^2 + m_{ор.}^2 + m_{вим.}^2} \quad (4)$$

$$\frac{dV}{V} = \frac{dh}{h} + \frac{dS}{S} \quad (5)$$

Перейшовши до СКП, отримаємо формулу, що виражає відносну похибку визначення об'єму через відносні похибки глибини та площі масиву:

$$\left(\frac{M_V}{V}\right)^2 = \left(\frac{M_h}{h}\right)^2 + \left(\frac{M_S}{S}\right)^2 \quad (6)$$

Звідси для обчислення априорної оцінки точності визначення об'єму необхідно знайти похибки M_S та M_h . Розрахуємо відповідні похибки таким чином:

$$M_S^2 = 4a^2 b^2 \left(\frac{m_B}{B}\right)^2 + a^2 b^2 \left(\frac{m_f}{f}\right)^2 + \frac{2\Delta Y Y_\Phi^2 b}{f^2} m_x^2 + \frac{b\Delta Y Y_\Phi^2 (4X_0^2 + a^2)}{2B^2 f^2} m_p^2 + \frac{a\Delta X Y_\Phi^2 (2Y_0^2 + 3b^2)}{B^2 f^2} m_p^2 \quad (7)$$

$$M_h^2 = h^2 \left[\left(\frac{m_B}{B}\right)^2 + \left(\frac{Y_\Phi m_p}{Bf}\right)^2 \right] + \frac{Y_\Phi^2}{f^2} m_x^2 + \frac{Y_\Phi^2 (B^2 m_{hx}^2 + h^2 m_p^2)}{B^2 f^2 L^2} m_p^2 + \frac{a\Delta X Y_\Phi^2 (2Y_0^2 + 3b^2)}{B^2 f^2} m_p^2 \quad (8)$$

Відносна похибка визначення площі дорівнюватиме:

$$\begin{aligned} & \frac{M_S^2}{S} \\ &= 4 \left(\frac{m_B}{B}\right)^2 + \left(\frac{m_f}{f}\right)^2 + \frac{2\Delta Y Y_\Phi^2}{a^2 b f^2} m_x^2 + \frac{\Delta Y Y_\Phi^2 (4X_0^2 + a^2)}{2a^2 b B^2 f^2} m_p^2 \\ &+ \frac{\Delta X Y_\Phi^2 (2Y_0^2 + 3b^2)}{B^2 f^2} m_p^2 \end{aligned} \quad (9)$$

де a, b – розмір масиву по осі абсцис та осі ординат відповідно; $\Delta X, \Delta Y$ – розміри сторін одного прямокутника сітки; X_0, Y_0 – фотограмметричні координати центральної точки масиву; $V_{\text{об}}$ – відстань до об'єкта; B – довжина базису знімання; f – фокусна відстань камери; m_B – похибка виміру базиса; m_x, m_y – похибка виміру координат на знімку; m_D – похибка виміру горизонтального паралаксу; m_f – похибка виміру фокусної відстані; L – кількість прямокутників сітки.

$$\begin{aligned} V_{\text{об}} &= 200 \text{ м}, & a &= 210 \text{ м}, & b &= 20 \text{ м}, & \Delta X = \Delta Y &= 5 \text{ м}, \\ X_0 &= 0; Y_0 &= 100 \text{ м}, & B &= 40 \text{ м}, & f &= 18 \text{ мм}, & m_B &= 5 \text{ мм}, \\ h &= 10 \text{ м}, & L &= 168, \\ m_x &= m_y = m_f = m_D &= 0,005 \text{ мм}. \end{aligned}$$

В результаті отримуємо наступні величини: $\frac{M_s}{S} = 0,05\%$ та $\frac{M_k}{k} = 0,58\%$.

Тоді відносна СКП визначення поверхневого об'єму буде складати $\frac{M_v}{V} = \frac{M_k}{k} = 0,58\% \cdot 0,6\%$.

Отже, розрахунки та аналіз отриманих величин дають змогу стверджувати, що точність визначення об'ємів не перевищує 1% при допустимих 2-3.

5. Виклад основного матеріалу

Протягом 2002–2005 рр. проведено чотири цикли цифрової стереофотограмметричної зйомки західної частини льодовика о. Галіндез та три цикли виходів льодовиків південної частини о-вів Галіндез та Вінтер. Отримано матеріали для визначення поверхневих об'ємів льодовиків. Результати визначення об'ємів подано в таблиці 2.

Під час XVIII сезонної Антарктичної експедиції виконано цифрову стереофотограмметричну зйомку західного та південного виходу льодовика острова Галіндез зі сталого базису, розташованого на острові Вінтер. Аналогічну зйомку проведено з острова Скуа на південний вихід льодовика, розташованого на острові Вінтер. Зйомка виконувалась цифровою камерою EOS 450D, з ПЗЗ – матрицею 12 млн. пікселів. При зйомці діапазон фокусної віддалі змінювався відповідно: 18, 35, 55 мм. Випадки зйомки: нормальний та відхилені.

З метою аналізу точності комплексного методу проведено апробацію застосування наземного лазерного сканера Faro Focus 3D із застосуванням його для сканування вищезначених виходів льодовиків [5].

Застосування комплексної методики дало можливість отримати повну цифрову модель місцевості, оскільки не завжди була можливість сканувати ті або інші форми поверхні льодовика – гроти, виходи печер, заглиблення тощо. Це взаємно компенсувалось обома методами. Крім цього, сканування обома методами дозволило отримати опорні та контрольні точки для орієнтування цифрових зображень.

5.1. Методика наземного лазерного сканування

Наземне лазерне сканування – це інноваційна технологія, як дозволяє з високою швидкістю та точністю визначати координати значної кількості точок (хмар точок) на поверхні об'єктів, які характеризують його форму, розміри та розташування в просторі.

Ця технологія реалізується з допомогою спеціальних приладів – наземних лазерних сканерів, які вимірюють горизонтальні (φ) та вертикальні (θ) й похилі відстані (S) до точок об'єкта (рис. 5). Координати точок обчислюються за відомими формулами:

$$\begin{cases} X = S \cdot \cos \varphi \sin \theta \\ Y = S \cdot \sin \varphi \sin \theta \\ Z = S \cdot \cos \theta \end{cases} \quad (10)$$

Сукупність точок, отриманих в результаті сканування на поверхні досліджуваного об'єкта, називають хмарию точок.

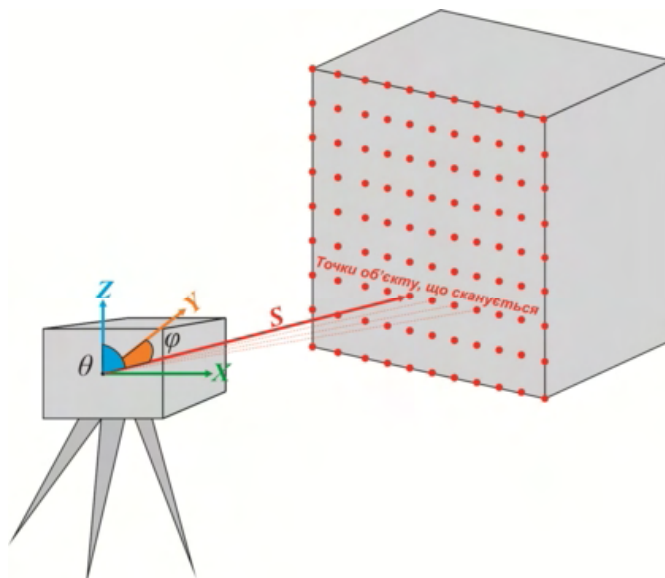


Рис. 5. Принцип визначення координат об'єктів, що скануються.

Визначення координат точок об'єкта здійснюється в умовній системі координат сканера. Її початок знаходиться в центрі сканера (рис. 5). Відповідно хмари точок, отримані з різних станцій сканування, будуть визначені в різних системах координат. Зрозуміло, що зйомку такого складного об'єкта, як льодовик, неможливо виконати з однієї станції, отож виникає потреба приведення всіх даних до єдиної системи координат.

Ця потреба реалізується шляхом використання спеціальних опорних марок, які розміщують рівномірно по об'єкту сканування таким чином, аби забезпечити видимість мінімум трьох спільних марок з двох сусідніх станцій сканування. Далі здійснюється перетворення між координатами кожного зі сканів та першим сканом:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} \quad , \quad (11)$$

де X_0, Y_0, Z_0 – координати точок в системі координат першого скану, X, Y, Z – координати точок в системі координат сусіднього наступного; $a_1, a_2, a_3, \dots, c_3$ – напрямні косинуси.

Напрямні косинуси визначаються:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= \cos \varepsilon \cos \xi - \sin \varepsilon \sin \eta \sin \xi \\ a_2 &= -\cos \varepsilon \sin \eta - \sin \varepsilon \sin \eta \cos \xi \\ a_3 &= -\sin \varepsilon \cos \xi \\ b_1 &= \cos \eta \sin \xi \\ b_2 &= \cos \eta \cos \xi \\ b_3 &= -\sin \eta \\ c_1 &= \sin \varepsilon \cos \xi + \cos \varepsilon \sin \eta \sin \xi \\ c_2 &= -\sin \varepsilon \sin \eta + \cos \varepsilon \sin \eta \cos \xi \\ c_3 &= \cos \varepsilon \cos \eta \end{aligned} \right\} \quad , \quad (12)$$

де ε, η, ξ – кути розвороту систем координат.

Графічно перетворення координат можна представити у вигляді рис. 6.

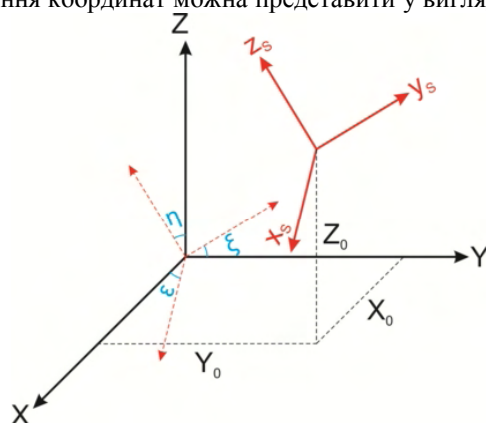


Рис. 6. Перетворення координат.

Можливий також варіант перетворення координат сканів до загально земної чи місцевої системи координат. Для цього під час виконання польових вимірів необхідно визначати координати опорних марок у відповідній системі координат. Це можна здійснити, використавши метод Глобальних Навігаційних Супутникових Систем (ГНСС), чи традиційні геодезичні методи.

Крім координат точок об'єкта, під час лазерного сканування відбувається також фіксація кольорових RGB характеристик. Це здійснюється на основі фотографування об'єкта цифровою фотокамерою високої роздільної здатності. Хмару точок з відповідними характеристиками RGB називають сканом.

Для польових вимірів застосовано наземний лазерний сканер Faro Focus 3D, який дає можливість отримувати координати точок на поверхні об'єкта з точністю до 2 мм та швидкістю 900 000 т./с. Радіус дії сканування – до 120 м.

Основні параметри, які необхідно встановлювати перед виконанням сканування, – це роздільна здатність, тобто кількість точок на одиницю площі, та ступінь якості сканування, для чого треба видалити сліди зовнішніх впливів (опади, пил) з допомогою спеціальних фільтрів. Зміна цих параметрів призводить до зміни тривалості сканування. З експериментальних досліджень встановлено оптимальні параметри сканування. Роздільна здатність сканування має забезпечувати відстань між точками сканування на поверхні льодовика в межах 3 см. При цьому тривалість сканування на одній станції не буде перевищувати 30 хв. Відстані між станціями сканування, сканером і поверхнею льодовика, сканером та опорними марками повинні бути в межах до 80 м.

Нами використовувались опорні марки розміром 40 x 40 см (рис. 7). Ці параметри дають можливість отримати надійні результати сканування та об'єднати хмари точок з кожної станції в єдину просторову модель.

Для проведення моніторингу стану льодовиків визначалися координати сканера та опорних марок. Для цього застосовувався комплект двох двочастотних ГНСС приймачів Leica GPS1200 (рис. 7). Один із приймачів попередньо був встановлений на геодезичному пункті VER1, який знаходиться поблизу станції Академік Вернадський, другий послідовно встановлювався на опорні марки та точки стояння сканера.

Виміри виконувались у кінематичному режимі. Похибка визначення координат точок не перевищувала 3 см. Сканування західного та південного виходів льодовиків о-ва Галіндез виконано з семи станцій, а південного виходу на о-ві Вінтер – з двох. На рис. 8, 9 подано схеми розташування станцій сканування та опорних марок для сканування льодовиків Галіндеза і Вінтера.

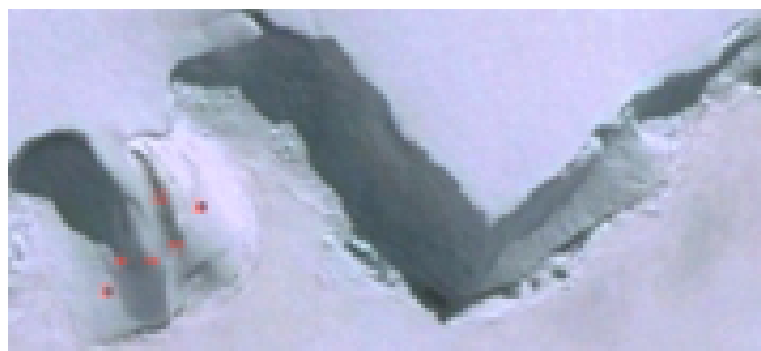


Рис. 7. Визначення координат опорних марок методом ГНСС.



(□ - опорні марки; ○ - станції сканування)

Рис. 8. Схема розташування контрольних марок та станцій сканування льодовика острова Галіндез.



(□ - опорні марки; ○ - станції сканування)

Рис. 9. Схема розташування контрольних марок та станцій сканування льодовика острова Вінтер.

Необхідно відзначити, що сканування виконувалось у складних погодних умовах – в дощ та при снігових зарядах. Ці опади на сканах були зафіксовані, а видалялися з використанням спеціальних фільтрів та в ручному режимі за допомогою програми Faro Scene. При апробації запропонованої технології виявлено, що різна за складом крига має відмінні відбиваючі властивості. Допустимі кути падіння лазерного променя на поверхню льодовика не повинні бути менші за 45°. При менших кутах приймання сканером відбитого сигналу практично відсутнє. З'являються й невідскановані ділянки.

Опрацювання результатів польових вимірювань проводилось за допомогою програмного забезпечення Leica Cyclone. Процес обробки складався з двох етапів: об'єднання сканів; створення цифрової моделі льодовика та визначення об'єму його танення.

Об'єднання, або зшивання, сканів здійснювалось на основі відомих координат опорних марок, визначених в геоцентричній системі координат WGS84 у проекції UTM. Середні квадратичні похибки зшивання сканів не перевищували 20 см. В результаті ми отримали 3-D моделі виходів льодовиків о-вів Галіндез та Вінтер (рис. 10–12).

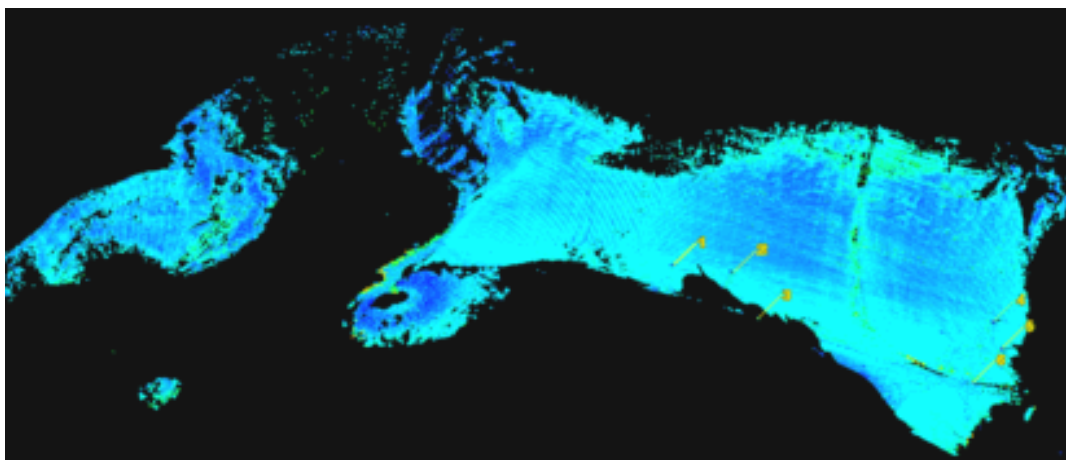


Рис. 10. 3-D модель західного боку льодовика (цифрами вказано місця розташування зв'язуючих марок).

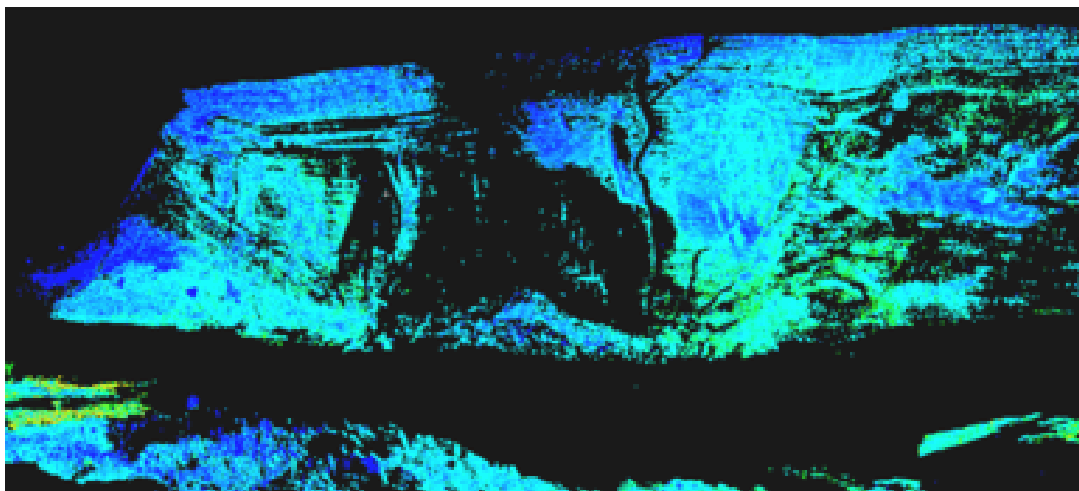


Рис. 11. Вигляд відсканованого південного виходу льодовика о. Галіндез.

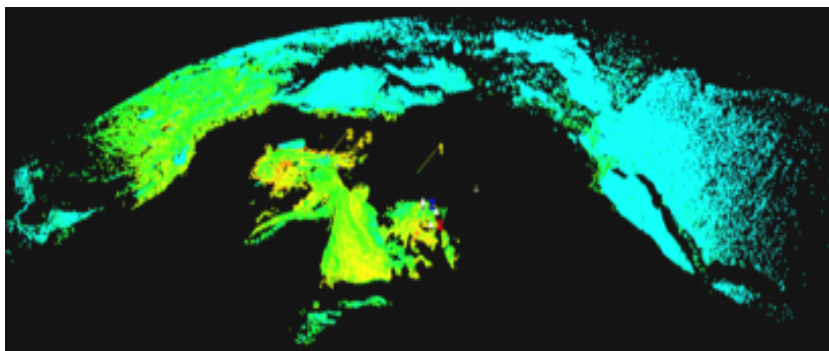


Рис. 12. Точкова модель південної частини льодовика на о-ві Вінтер (цифрами вказано місця розташування зв'язуючих марок).

5.2. Визначення приповерхневих об'ємів досліджуваних льодовиків

Для визначення безпосередньо поверхневих об'ємів використовувались цифрові моделі, отримані 2005 року цифровим стереофотограмметричним методом та лазерним скануванням у 2013 р. [5]. На рис. 13-18 представлено панорамні зображення досліджуваних льодовиків за 2005 та 2013 рр.



Рис. 13. Загальний знімок західного боку льодовика на о. Галіндез (2005 р.)



Рис. 14. Загальний знімок західного боку льодовика на о. Галіндез (2013 р.)



Рис. 15. Південний вихід льодовика на о. Галіндез (2005 р.)

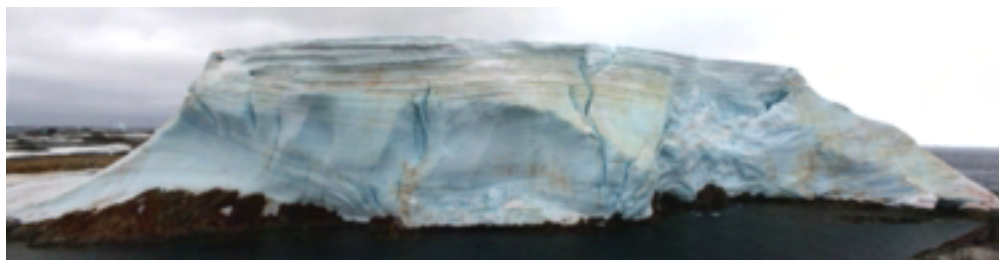


Рис. 16. Південний вихід льодовика на о. Галіндез (2013 р.)



Рис. 17. Південний вихід льодовика на о. Вінтер (2005 р.)



Рис. 18. Південний вихід льодовика на о. Вінтер (2013 р.)

Обчислення об'ємів виконано за формулою (4). У результаті опрацювання отриманих матеріалів визначено поверхневі об'єми трьох виходів острівних льодовиків: два на Галіндезі та на о-ві Вінтер. За результатами наземної цифрової зйомки, виконаної в 2005 р., та досліджень 2013 року встановлено зміни поверхневого об'єму льодовиків: 64 тис. м³ для західної частини льодовика на острові Галіндез, 94 тис. м³ – для південної частини цього льодовика та 82 тис. м³ для льодовика на острові Вінтер.

Таблиця 2

Результати визначення приповерхневих об'ємів льодовиків архіпелагу Аргентинські острови

Льодовик о. Галіндез, західна частина		Льодовик о. Галіндез, південна частина		Льодовик о. Вінтер	
Період часу	Об'єм (м ³)	Період часу	Об'єм (м ³)	Період часу	Об'єм (м ³)
2002 – 2003	23 000	2002 – 2003	1481	2002 – 2003	–
2003 – 2004	28 000	2003 – 2004	360	2003 – 2004	1256
2004 – 2005	17 000	2004 – 2005	4817	2004 – 2005	4817
2005 – 2013	64 000	2005 – 2013	94 000	2005 – 2013	82 000

На рис. 19 подано швидкості зміни приповерхневих об'ємів досліджуваних льодовиків з 2002 по 2013 р. в еквіваленті водного стовпа.

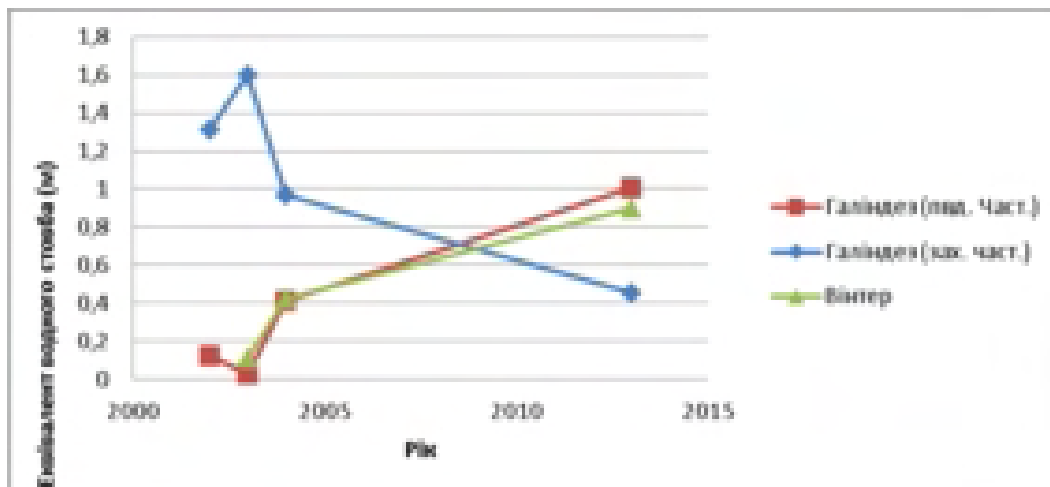


Рис. 19. Графік зміни приповерхневих об'ємів досліджуваних льодовиків.

За даними таблиці 2 можна побачити, що середня швидкість зменшення об'єму західної частини льодовика о. Галіндез складає $12\ 000\ \text{м}^3/\text{р}$ – 0,70 м еквівалента водного стовпа на рік. Середня швидкість зменшення південної частини льодовика о. Галіндез дорівнює $9150\ \text{м}^3/\text{р}$ – 0,78 м еквівалента водного стовпа на рік. Льодовик о. Вінтер зменшується з середньою швидкістю $8800\ \text{м}^3/\text{р}$ – 0,70 м еквівалента водного стовпа на рік. Як бачимо, середні швидкості зменшення льодовиків є практично однаковими. Якщо порівняти з показниками 60-х років ХХ ст., можна стверджувати, що швидкість танення досліджуваних льодовиків зросла у 8 разів.

З таблиці 2 та рис. 19 можемо побачити, що за період з 2005 по 2013 р. швидкість танення льодовика о. Вінтер та південної частини льодовика о. Галіндез збільшилася. Швидкість танення західної частини льодовика о. Галіндез протягом 2005–2013 рр., навпаки, зменшилася.

Аналізуючи отримані результати, можна помітити кардинальні зміни, що сталися за вісім років. Це підтверджується визначеними кількісними параметрами, причому двома незалежними методами.

6. Висновки

1. Результати зйомки цифровим стереометричним методом підтвердили суттєві кількісні зміни поверхневих об'ємів островних льодовиків Аргентинського архіпелагу.

2. Застосування наземного лазерного сканування дало змогу перевірити та підтвердити точність цифрового стереофотограмметричного методу.

3. Результати визначення приповерхневих об'ємів льодовиків о-вів Галіндез та Вінтер свідчать про зростання швидкості їх танення. Причому ця швидкість не є однорідною: якщо для західної частини льодовика о. Галіндез вона сповільнюється, то для південної частини цього льодовика та льодовика о. Вінтер швидкість зростає однаково.

4. У порівнянні з 60-ми рр. ХХ ст. середні швидкості танення досліджуваних льодовиків збільшилися практично у 8 разів та складають: для західної частини льодовика о. Галіндез 0,70 м водного стовпа на рік; для південної частини льодовика о. Галіндез – 0,78 м водного стовпа на рік; для льодовика о. Вінтер – 0,70 м водного стовпа на рік.

5. У подальшому планується щороку здійснювати моніторинг вищевказаних льодовиків з метою виявлення зміни поверхневих об'ємів криги. Це дасть можливість отримати об'єктивні результати про стан льодовиків цього регіону.

Література

1. **Глотов В.** Мониторинг малых ледников как индикаторов изменений климата в районе Антарктического полуострова. Український антарктичний журнал. – 2003. – №1. – С. 93–99.
2. **Глотов В.М.** Моніторинг острівних льодовиків Антарктичного узбережжя // Наук.-техн. журн. “Вісник геодезії та картографії”. – Київ. – 2006. – №1. – С. 31–34.
3. **Глотов В.** Визначення динаміки поверхневих об'ємів острівних льодовиків як складова частина ГІС „Антарктида. Збірн. наук. праць. X Міжнар. наук.-техн. симпозиум „Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища. – GPS і GIS технології”. 6–10 вересня 2005 р. – Алушта. – С. 172–176.
4. **Small ice cap dynamic in the Antarctic Peninsula rapid climate change conditions.** XXVIII SCAR Open Science Conference, Bremen, 2004 – Abstracts, Session 08: S08/O10. – 2004. – P. 216–217.
5. **К. Третяк, В. Глотов, Ю. Голубінка.** Аналіз результатів моніторингу острівних льодовиків Антарктичного узбережжя лазерним скануванням та цифровим стереофотограмметричним методом. Збірник наукових праць «Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва», Зб. наук. праць ЗГТ. – Львів, 2013 р. – № 1. – С. 130–136.
6. **Thomas R.H.** Studies on the Ice Cap of Galindez Island, Argentine Island // British Antarctic Survey Bulletin. – London: Published by the British Antarctic Survey, 1963, p. 27–44.
7. **Sadler I.** Observation on the ice cap of Galindez and Skua Islands, Argentine Islands, 1960–66 // BAS Bulletin No. 17, 1968, p. 21–49.
8. **Fleming, W.L.S.** Relic glacial forms on the western seabord of Graham Islands. Geogr. J., 96, No. 2, 93–100.
9. **Gourdon E.** 1908 Geographie physique – glaciology-petrographie des regions visitees par l'Expedition Antarctique Francaise (1903–1905). Paris, Masson et Cie. Sciences naturelles: documents scientifiques.
10. **Thomas R.H.** Studies on the ice cap of Galindez island, Argentine islands // British Antarctic Survey bulletin, 1963, 27.
11. **Sadler I.** / Observations on the ice cap of Galindez and Skua Islands, Argentine islands, 1960–66 // British Antarctic Survey bulletin, 1968, 22–49.