

КАРТОГРАФІЯ І АЕРОФОТОЗНІМАННЯ

CARTOGRAPHY AND AERIAL PHOTOGRAPHY

УДК 528.71/72

В. М. ГЛОТОВ¹, Х. І. МАРУСАЖ^{2*}

¹ Кафедра фотограмметрії та геоінформатики, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013, тел. +38 (032)258-26-16, volodymmail@mail.ru

^{2*} Кафедра фотограмметрії та геоінформатики, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013, тел. +38 (098)7668431, kh.marusazh@gmail.com

ОПТИМІЗАЦІЯ ІНТЕРВАЛУ СІТКИ ДЛЯ ПОБУДОВИ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ РЕЛЬЄФУ ПІД ЧАС ВИЗНАЧЕННЯ ПОВЕРХНЕВИХ ОБ’ЄМІВ ОСТРІВНИХ ЛЬДОВИКІВ АНТАРКТИЧНОГО УЗБЕРЕЖЖА

Мета. Серед методів отримання даних для спостережень за станом льодовиків можна виділити гляціологічні, геодезичні та фотограмметричні методи. Фотограмметричний метод, як відомо, належить до дистанційних методів, отже, його застосування для дослідження даних об’єктів є безумовно доцільнішим. Це передовсім обумовлюється тим, що немає безпосередньої необхідності працювати на тілі льодовика, а це, як відомо, дуже небезпечно. Окрім цього, точність визначення об’ємів льодовиків за цим методом задовольняє вимоги гляціологів. Однією з досить вагомих проблем під час реалізації стереофотограмметричного методу є технологія побудови цифрової моделі рельєфу поверхні виходів льодовиків. Важливим етапом є вибір методу задання ЦМР. У разі побудови ЦМР за регулярним розміщенням вузлів сітки одним з процесів є визначення параметрів сітки. Основною метою роботи є оптимізація інтервалу сітки, що дасть змогу підвищити ефективність та технологічність опрацювання даних. **Методика.** Для побудови цифрової моделі рельєфу задається регулярна сітка з квадратною елементарною коміркою. На розміри елементарної комірки впливають такі величини, як похибки визначення координат точок, довжин ліній, а також похибки визначення площі, глибини та об’єму льодовика. Алгоритм визначення оптимального інтервалу сітки передбачає такі етапи роботи: обчислення апріорної оцінки точності визначення координат точок, врахування граничних відносних похибок визначення об’єму, глибини та площі льодовиків та безпосередній розрахунок оптимального інтервалу сітки. Апріорна оцінка точності визначення координат точок є першим і обов’язковим етапом, оскільки середньоквадратичні похибки визначення фотограмметричних координат точок впливають на всі наступні виміри та процеси. Другим етапом є задання точності визначення об’єму льодовиків. Приймається, що ця похибка становитиме 1 %. Третій етап передбачає врахування допустимої глибини об’єкта в межах комірки сітки. Четвертим етапом роботи є обчислення граничної відносної похибки визначення площі об’єкта, враховуючи граничні відносні похибки визначення об’єму та глибини. Останнім – п’ятим етапом є розрахунок інтервалу сітки, який визначається як довжина сторони елементарної комірки сітки з урахуванням похибок площі та сторони комірки. Обчислений інтервал також дає змогу визначити кількість та щільність вузлів сітки, в яких виконуватимуться виміри на поверхні льодовиків. **Результати.** Представлено алгоритм та запропонована формула розрахунку оптимального інтервалу сітки для побудови ЦМР поверхонь виходів льодовиків. **Наукова новизна.** Вперше запропонований алгоритм оптимізації інтервалу сітки для побудови цифрової моделі рельєфу під час визначення об’єму не тільки льодовиків, а й інших досліджуваних об’єктів. **Практична значущість.** Цей алгоритм дасть змогу значно зменшити час опрацювання матеріалів цифрового наземного стереофотограмметричного знімання та отримувати значення поверхневих об’ємів льодовиків Антарктичного узбережжя на островах Вінтер та Галіндез з відповідною точністю.

Ключові слова: наземний цифровий стереофотограмметричний метод; наземні цифрові знімки; цифрова модель рельєфу; інтервал сітки; поверхневий об’єм льодовика.

Вступ

Для аналізу поверхонь льодовиків та їхніх кількісних параметрів використовують цифрові

моделі рельєфу. Одним з основних параметрів під час побудови ЦМР є вибір методу її задання. Розглянемо детальніше методи отримання

даних про рельєф поверхонь об'єктів та методики створення за цими даними цифрових моделей рельєфу.

Застосування картометричного методу для визначення об'єму льодовика запропоновано в публікації [Krimmel R. M., 1989]. Топографічні карти льодовика Південного Каскаду були отримані за допомогою перспективного аерофотознімання у 1958, 1961, 1964, 1977, 1980 та 1985 роках. Для визначення об'єму на картах у відповідному масштабі розграфлювали сітку з розміром комірки 100×100 метрів. В отриманих комірках визначали товщину льоду, тобто різницю висот дна і поверхні льодовика. Похибка вимірів, як зазначає автор, за даними карт становила близько 0,2 м. Значення об'єму всього льодовика обчислювали як суму об'ємів елементарних комірок сітки.

Результати, отримані картометричним методом, порівнювали з даними традиційних гляціологічних досліджень. Для цього результати інтерпретували як чистий баланс мас за 1958–1985 рр., який відповідно становив 12,7 м за даними картометричного методу та 10 м – за даними гляціологічних досліджень. Автор припускає, що отримана розбіжність може бути спричинена систематичними похибками визначення висот за картами (-1 м/рік) або визначення балансу мас гляціологічними методами (0,1 м/рік). Однак різницю значень балансу мас льодовиків за даними картометричного та гляціологічного методів не досліджували.

Варто зазначити, що окрім розбіжності в результатах досліджень, у публікації не представлено пояснень до вибору інтервалу сітки на карті.

У публікації [Бурштинська Х. В., 2000] вхідну інформацію про рельєф отримували картометричним методом, а саме способом відтежування або сканування горизонталей з доповненням точковою інформацією. Оптимізацію вибору інтервалу здійснювали на основі кореляційно-спектрального аналізу рельєфу, вважаючи що після вилучення тренду рельєф є випадковою функцією, статистичні характеристики цієї функції описуються кореляційною функцією. Оптимальний інтервал між точками визначали за заданим допустимим значенням спектра.

Для апробації запропонованого способу виконували експериментальні роботи на трьох тестових ділянках з різним характером рельєфу. Отримані результати порівнювали з тестовими ізолініями та визначали їх відхилення від побудованих. За результатами досліджень встановлено, що оптимальний інтервал дискретизації становить 3 мм.

Потрібно наголосити, що наведений спосіб вибору оптимального інтервалу слід використовувати за високих вимог до точності створення ЦМР. Такий підхід може бути застосований для побудови ЦМР та ізоліній на основі картометричного методу отримання даних. Проте, в публікації не вказано, чи можливе застосування способу для визначення інтервалу фотограмметричним методом з метою урахування допустимої похибки за глибину під час визначення таких параметрів, як площа та об'єм об'єкту, який досліджується.

Вибір наземного стереофотограмметричного методу для побудови ЦМР поверхні льодовика розглянуто в роботах [Глотов В. М., 2004; Hlotov V., 2008; Третяк К. Р., 2013; Третяк К. Р., 2013]. Протягом 2002–2005, 2013, 2014 років виконувалось наземне цифрове стереофотограмметричне знімання виходів льодовиків Антарктичного узбережжя на островах Вінтер та Галіндез. Камеральну обробку отриманих матеріалів здійснювали на цифровій фотограмметричній станції “Дельта-2”.

Визначення об'єму виконувалося в програмному пакеті “Digitals”. На поверхні виходу льодовика набирали пікетні точки (приблизно 1500–2000 пікетів) на характерних поверхнях рельєфу льодовика. Після цього визначали умовний об'єм циклу відносно поверхні, утвореної пікетами, та вертикальної площини, яка задавалась від краю льодовика. Далі аналогічно обробляли наступний цикл і визначали різницю цих об'ємів. У результаті розрахунків отримували різницю поверхневих об'ємів суміжних циклів, тобто зміну цієї величини між сезонами. Априорна оцінка точності визначення об'ємів становила 1,2 %.

Проте, автори не приводять конкретно методу побудови ЦМР і інтервалу сітки.

Використання наземного цифрового стереофотограмметричного знімання для моніторингу

скельних льодовиків розглянуто в публікаціях [Kaufmann V., 2008; Kaufmann V., 2008]. У працях пропонується використання дешевих цифрових камер та потужного програмного забезпечення. Таке поєднання розглянуто на практичному прикладі досліджень 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 виконано з використанням сучасних методів комп'ютерної візуалізації на цифрових фотограмметричних станціях. Для побудови ЦМР використовувалась регулярна сітка з інтервалом 5 м та характерні точки рельєфу (межі, дренажні лінії, лінії хребта).

Як було уже зазначено, у вище розглянутих дослідженнях, для побудови цифрової моделі рельєфу обирали характерні точки на поверхнях льодовиків. Хоча, в роботах [Kaufmann V., 2008; Kaufmann V., 2008], окрім характерних точок, використовували регулярну сітку, проте вибір інтервалу не був обґрунтований у публікаціях.

Гібридний алгоритм опрацювання рельєфу для створення ЦМР запропоновано компанією INPHO (Німеччина) [Расказова Н. С., 2010]. Розробники INPHO переконані, що найкращу точність побудови моделі рельєфу для екологічних цілей забезпечить гібридна модель, представлена у вигляді регулярної сітки, накладеної на структурні лінії рельєфу (лінії перегину, тальвеги, вододіли, лінії річок, промоїни). Дані про значення відміток висоти будуть сформовані не тільки в вузлах регулярної сітки, але і в місцях перетину сітки зі структурними лініями.

З позиції екологічного картографування ця гібридна модель виглядає дуже привабливо, оскільки дає змогу враховувати структуру рельєфу місцевості. Проте, в роботі не розглядається вибір інтервалу регулярної сітки ні залежно від характеру рельєфу, ні залежно від вимог до точності майбутньої ЦМР.

Використання орографічно-триангуляційної моделі для побудови цифрової моделі рельєфу пропонується в публікації [Карпінський Ю. О., 2000]. Модель передбачає об'єднання орографічної (структурної) та триангуляційної

(TIN – Triangulation Irregular Network) моделей, що дасть змогу вирішити проблему рельєфної неоднозначності на основі виконання триангуляції.

Запропонований алгоритм апробовано для значних масивів вхідних даних із застосуванням методів декомпозиційної триангуляції на основі просторової індексації точок рельєфу, орографічних та граничних ліній. Автори зазначають, що використання алгоритму дає змогу побудувати функцію визначення висоти у будь-якій наперед заданій точці місцевості в межах області її визначення, конкретну за точністю та морфологією рельєфу. Такий підхід є, безперечно, доцільним для опрацювання масивів даних великих за площею територій. Однак, у разі опрацювання даних для деяких локальних ділянок, не вказується залежність між щільністю вхідної множини точок та точністю результуючої ЦМР.

Методика побудови ЦМР за даними аерофотознімання описана в статті [Karabork H., 2004]. Об'єктом досліджень була територія університету Сельчук (Туреччина). Тестова ділянка займала площу 1 км² і складалась з 440 точок – вузлів сітки, розміщеної на території університету з інтервалом 50 м. Координати цих вузлів сітки визначались тахеометром Topcon GTS4. Також були отримані аерофотознімки у масштабі 1:10000 та 1:16000. Опрацювання матеріалів аерознімання виконували у програмних пакетах (ПП) PHOTOMOD та eComputer Imaging. ЦМР автоматично генерували за координатами точок, виміряних тахеометром і за аерофотознімками.

Середньоквадратична похибка (СКП) визначення висоти становила відповідно для першої програми – 0,96 м та для другої – 0,99 м.

Варто наголосити, що інтерполяція точок залежно від ПП виконувалась по-різному і ЦМР були отримані з різною щільністю точок. Проте, роль інтервалів сітки не було досліджено. Очевидно, що методи дають різні результати за різних інтервалів сітки.

У дослідженні [Сахуно В. С., 2009; Сахуно В. С., 2009] для побудови цифрової моделі рельєфу застосовували цифровий наземний стереофотограмметричний метод. Координати опорних точки визначали за допомогою тахео-

метра Topcon GPT 3005. Для знімання використовували цифрову камеру Canon A540. Отриману стереопару опрацьовували в ПП Photo Modeler.5.2 та Arc View 3.2: для побудови стереомоделі та горизонталей відповідно. Об'єм льодовика обчислювали програмним шляхом за побудованими горизонталлями. Також виміряно 47 контрольних точок для визначення СКП інтерполяції точок.

Треба зазначити, що кількість точок ЦМР редагувалась експериментальним шляхом, використовуючи графік залежності похибок визначення об'єму та щільності точок.

За результатами досліджень виявлено, що ефективна щільність точок 475 точок на 540 м², або близько 14 очок на 4 м². СКП інтерполяції становить 6,76 см, а об'єму 7,041 м³ або 0,23 %.

Вплив щільності вхідних даних на точність визначення об'єму за ЦМР представлено у публікації [Sokol S., 2014]. Для експериментальних досліджень обрано прямокутну ділянку місцевості з рівнинним рельєфом розміром 20×30 з довільною щільністю точок від 0,1 до 1 м. Об'єм ділянки обчислювали у ПП Surfer методом поперечних перерізів. Вплив щільності точок на значення об'єму визначали як відношення різниці інтегрально обчисленого об'єму (ідеальне значення) та об'єму за ЦМР до ідеального значення об'єму. Результати дослідження підтвердили вплив щільності вхідних даних на визначення об'єму за допомогою ЦМР: у разі зменшення щільності точок точність результатів підвищується.

Потрібно наголосити, що в роботі подано результати впливу щільності точок на значення об'єму за різних інтервалів сітки, проте оптимальне значення інтервалу ЦМР не було розраховане.

Вплив розміру комірки сітки на похибки висот інтерпольованої ЦМР представлено в роботі [Kienzle S. W., 2004]. Для досліджень використовували ділянку місцевості (Канада) з регулярно розташованими точками через 100 м. Щоб визначити інтервал сітки, застосовано три підходи: аналіз перевищень точок, аналіз кумулятивних розподілів частот за допомогою тесту Колмогорова-Смирнова і СКП виміру схилів. Під час досліджень виконавці виявили такі особливості: всі змінні (схил, експозиція,

план і профіль кривизни) змінюються під час зміни розміру інтервалу сітки; щільність точок або перевищення точок впливають на інтервал ЦМР для отриманого каталогу висот точок; реальні значення схилів та експозиції неможливо отримати, використовуючи ЦМР на основі регулярної сітки з інтервалом 100 м, інтервал сітки має бути 10 м або менше.

За результатами дослідження встановлено, що оптимальний розмір комірки сітки становить від 5 до 20 м, залежно від складності рельєфу місцевості.

Вибір інтервалу сітки експериментальним шляхом для побудови ЦМР також описано в публікації [Dai T. F., 2008]; запропоновано метод оптимізації, який забезпечує максимум продуктивності і точності отримання результатів навіть для дуже великих наборів даних. Тестовою ділянкою є долина річки Ріо Тінто в Іспанії. Набори даних, що використовували для роботи, представляли рівномірний рельєф і типові геологічні умови для Іспанії. Вхідними даними були цифрові моделі рельєфу регіонального (близько 1000000 точок) та місцевого рівнів. Для апробації алгоритму інтервал сітки змінювали декілька разів, наприклад, у першому випадку для побудови місцевої ЦМР з інтервалом сітки 5 м використовували регіональну ЦМР з інтервалом 45 м. Такий розрахунок займає близько 13 годин (за кількості пунктів – 7200000 точок у сітці, на персональному комп'ютері Pentium 2-500).

Варто зауважити, що в роботі не подано аналіз точності отриманих ЦМР та обґрунтування вибору інтервалу сітки.

У роботі [Chandler J., 2002] розглянуто результати моніторингу зміни русла річки за допомогою цифрових наземних перспективних знімків та автоматизованих фотограмметричних пакетів Erdas Imagine. Проаналізувавши статтю, можна зробити висновок, що як і в попередніх випадках інтервал сітки для побудови ЦМР не був обумовлений. Подібна ситуація проглядається і в роботах [Winkler M., 2012, Sanz-Ablanedo, E., 2012], де для моніторингу використовували цифрові моделі рельєфу льодовиків (купол Кіліманджаро та Славбард відповідно). В обох випадках для побудови ЦМР використовувались наземні знімки, а інтервал сітки обирали довільно.

У роботі [Triglav M., 2013] подано результати моніторингу льодовиків Словенії. Для спостережень застосовувались геодезичні методи (супутникові спостереження), аерофотознімання, лідарне та радарне знімання протягом різних періодів часу (1946–2012 рр.). За аерофотознімками побудовано ЦМР з інтервалом сітки 2 м. Проте вибір такого інтервалу є необґрунтованим у роботі.

Розрахунок визначення щільності регулярної сітки бікубічної сплайн-інтерполяції (БСІ) під час створення ЦМР подано у роботі [Буряк К., 2014; Буряк К., 2015]. Як вхідні дані обрано ділянки рельєфу з нанесеними на них регулярними сітками з довжиною сторони 100 м. Сформувавши поверхні, задані поліномом, досліджено точність відображення ЦМР. Залежно від категорії складності рельєфу СКП побудованої ЦМР складала: для 2-ї категорії – 0,885 м, 4-ї категорії – 1,339 м та для 5-ї категорії – 0,891 м. Після згущення сітки отримали такі результати: при 33-метровій сітці – 0,433 м і 0,096 м для 11-метрової.

Треба зазначити, що в результаті проведених досліджень виконано апостеріорну оцінку впливу розміру квадратної регулярної сітки та категорії складності рельєфу на СКП визначення висот за цифровою моделлю рельєфу, створеною бікубічною сплайн-інтерполяцією та встановлені кореляційні залежності між цими параметрами. Також представлено графік залежності точності визначення висоти точки за ЦМР від інтервалу регулярної сітки та категорії складності рельєфу, що дає змогу вибрати оптимальні розміри регулярної сітки. Розраховані розміри регулярної сітки, задовольняють нормативні вимоги щодо точності визначення висот у цих районах робіт.

Проаналізувавши ці праці, варто зауважити, що використання такої методики займає багато часу на безпосереднє проведення польових досліджень, а також аналіз та статистику отриманих даних.

У праці [Вашук О. М., 2012] представлено методику розрахунку об'ємів складів готової продукції булощебеневої сировини. Визначення об'єму насипу проводили чотирма способами: за допомогою геоінформаційної програми AutoCAD Civil 3D 2012; способом вертикальних

паралельних перерізів; способом розбиття насипу на правильні геометричні фігури; способом об'ємної палетки П. К. Соболевського. Аналіз результатів показав, що найближчими значеннями до еталонного були значення об'ємів досягнуті способами розбиття на найпростіші геометричні фігури та способом вертикальних паралельних перерізів із відстанню між перерізами 5 м з відхиленням значень об'ємів відповідно 0,481 та 0,622 %. Найменш точними виявилися способи вертикальних паралельних перерізів через 20 м з відхиленнями у -11,955 %.

Програмне забезпечення, що застосоване для підрахунку об'ємів, має низку переваг: можна змінювати інтервал палетки, відстань між перерізами, досягаючи таким чином підвищення визначення об'єму; також зникають помилки, викликані людським фактором.

Проте, потрібно наголосити, що попри деяку простоту, існує низка недоліків вищезазначених методів, відповідно: 1) для підвищення точності визначення істинного об'єму насипу потрібно знизити похибки тахеометричної зйомки. Основною проблемою є використання програмного забезпечення: вартість і високі вимоги до професійного рівня фахівця; 2) автоматизація алгоритмізації способу є досить складною, тому в більшості геоінформаційних систем (ГІС) спосіб не реалізований. Використовуючи такий спосіб підрахунку об'ємів, постає проблема обчислення об'єму крайніх блоків насипу. У такому разі потрібно окремо розглядати кожний крайній блок і залежно від його форми обчислювати його об'єм за відповідними формулами; 3) під час обчислення об'єму способом об'ємної палетки П. К. Соболевського за наявності не цілих квадратів потрібно враховувати кількість таких квадратів відповідно до об'ємної частки їх заповнення. Тобто, що більша кількість не цілих квадратів і що менше вони заповнені, то більший об'єм камеральних робіт; 4) під час підрахунку об'єму способом розбиття об'ємної моделі на найпростіші фігури тіло розбивають на окремі фігури і знаходять об'єм кожної фігури за окремими формулами, що ускладнить роботу для великих об'єктів.

Проаналізувавши літературні джерела, 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; з нерегулярним поданням точок по структурних лініях, профілях, центрах площ, локальних точках; з ізолінійним заданням точок. Треба наголосити, що в більшості досліджень, де використовували регулярну сітку для побудови ЦМР, інтервал встановлений експериментальним шляхом або не обґрунтований у працях. Тому, можна зробити висновок, що досі остаточно не розроблено методики розрахунку оптимального інтервалу сітки для побудови цифрової моделі під час визначення об'ємів льодовиків.

Мета

Серед методів отримання даних для спостережень за станом льодовиків можна виділити контактні та методи дистанційного зондування [Марусаж Х., 2014]. Контактні методи є недостатньо технологічними, а з погляду охорони праці у більшості видів робіт небезпечними. Методи дистанційного зондування, такі як повітряне лазерне сканування, космічне та радарне знімання, доцільніше застосовувати для визначення довгострокових змін великих за площею територій. Водночас стереофотограмметричний метод задовольняє техніко-технологічні вимоги та виключають небезпечність під час виконання робіт, отже його застосування для дослідження даних об'єктів є безумовно доцільнішим. Окрім цього, точність визначення об'ємів льодовиків за цим методом задовольняє вимоги гляціологів [Zemp M., 2009].

Однією з досить вагомих проблем під час реалізації стереофотограмметричного методу є технологія побудови цифрової моделі рельєфу поверхні виходів льодовиків. Як вже зазначалось вище, існують різні форми задання ЦМР. У нашому випадку цифрова модель рельєфу задається регулярним розміщенням

точок на прямокутній сітці, а одним з процесів її побудови є визначення параметрів сітки. Основною метою роботи є оптимізація інтервалу сітки, що дасть змогу підвищити ефективність та технологічність опрацювання даних.

Методика

Для побудови цифрової моделі рельєфу передбачається задання регулярної сітки з квадратною елементарною коміркою. Значення координат точок поверхні виходів льодовиків визначатимуться у вузлах створеної сітки. Для вибору вершини регулярної мережі потрібно обчислити оптимальний інтервал сітки.

На розміри інтервалу сітки передовсім впливають такі величини: похибки визначення координат точок, довжин ліній, а також похибка визначення глибини, площі та об'єму об'єкта.

Оскільки існують відповідні вимоги до точності отримання значень об'ємів, то під час 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 наперед заданої величини [Зазуляк П. М., 2007].

Розглянемо послідовно алгоритм визначення оптимального інтервалу сітки.

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. Для обчислення СКП визначення фотограмметричних координат точок при нормальному випадку знімання використовують такі формули [Третяк К. Р., 2013]:

$$\left. \begin{aligned} m_x &= x_3 \cdot m \left(\frac{m_{x_1}^2}{x_3^2} + \frac{m_{p_\phi}^2}{B^2 f^2} + \left(\frac{Y_\phi x_n^2}{B f^2} \right)^2 m_{\Delta\alpha}^2 + \left(\frac{x_2 z_2 Y_\phi}{B f^2} \right)^2 m_{\Delta\omega}^2 + \left(\frac{Y_\phi z_2}{B f} \right)^2 m_{\Delta\kappa}^2 + \left(\frac{x_2}{f} \right)^2 m_{\Delta\nu}^2 \right)^{1/2} \\ m_{y_\phi} &= f \cdot m \left(\frac{m_{p_\phi}^2}{B^2 f^2} + \left(\frac{Y_\phi x_n^2}{B f^2} \right)^2 m_{\Delta\alpha}^2 + \left(\frac{x_2 z_2 Y_\phi}{B f^2} \right)^2 m_{\Delta\omega}^2 + \left(\frac{Y_\phi z_2}{B f} \right)^2 m_{\Delta\kappa}^2 + \left(\frac{x_2}{f} \right)^2 m_{\Delta\nu}^2 \right)^{1/2} \\ m_{z_\phi} &= z_3 \cdot m \left(\frac{m_{x_1}^2}{z_3^2} + \frac{m_{p_\phi}^2}{B^2 f^2} + \left(\frac{Y_\phi x_n^2}{B f^2} \right)^2 m_{\Delta\alpha}^2 + \left(\frac{x_2 z_2 Y_\phi}{B f^2} \right)^2 m_{\Delta\omega}^2 + \left(\frac{Y_\phi z_2}{B f} \right)^2 m_{\Delta\kappa}^2 + \left(\frac{x_2}{f} \right)^2 m_{\Delta\nu}^2 \right)^{1/2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де Y_ϕ – відстань до об'єкта; B – довжина базису знімання; f – фокусна відстань камери; x_n, z_n – вимірні координати на знімках; m – знаменник масштабу знімання; m_{x_n}, m_{z_n} – похибка виміру координат на знімку; m_p – похибка вимірювання горизонтального паралаксу; $m_{\Delta\alpha}, m_{\Delta\omega}, m_{\Delta\psi}, m_{\Delta\chi}$ – залишкові похибки визначення кутових елементів зовнішнього орієнтування знімків.

Другим етапом є задання точності визначення об'єму льодовиків. Об'єм об'єкта визначають за формулою (2):

$$V = S\Delta Y, \quad (2)$$

де ΔY – глибина льодовика.

Для оцінювання точності визначення об'ємів, продиференціюємо формулу (2) за обома змінними і, поділивши обидві частини рівняння на V , знайдемо:

$$\frac{dV}{V} = \frac{dS}{S} + \frac{d\Delta Y}{\Delta Y}. \quad (3)$$

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

$$\frac{mV}{V} = \frac{m_S}{S} + \frac{m_{\Delta Y}}{\Delta Y}. \quad (4)$$

Відносна похибка визначення об'єму за такими розрахунками дорівнюватиме 1–2 % [Катушков В. О., 1994]. Під час подальших розрахунків вважатимемо, що гранична відносна похибка визначення об'єму становить 1 %.

Третій етап передбачає визначення граничної відносної похибки визначення глибини об'єкта. Значні коливання глибин точок на місцевості призводять до зміщень їхніх зображення на знімках. Знайдемо граничне значення глибини в межах елементарної комірки сітки [Глотов В. М., 2009]:

$$2\Delta Y_{гран.} = 2 \frac{fM}{r} \delta_{\Delta Y_{гран.}}, \quad (5)$$

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

З формули (5) знайдемо $\Delta Y_{гран.}$ в межах

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

$$\frac{m_{\Delta Y}}{\Delta Y} = \frac{\delta_{\Delta Y_{гран.}}}{\Delta Y_{гран.}}. \quad (6)$$

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 (4).

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

$$\frac{m_S}{S} = \frac{m_s}{s}. \quad (7)$$

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

$$s = a^2, \quad (8)$$

де a – довжина сторони комірки.

Продиференціюємо (8) та перейдемо до СКП:

$$m_s = 2am_a. \quad (9)$$

З формули (7) знайдемо відносну похибку визначення площі елементарної комірки та прирівнявши (8) та (9) знайдемо довжину сторони елементарної комірки сітки:

$$a = \frac{2m_a}{\frac{m_s}{s}}, \quad (10)$$

де

$$m_a = \sqrt{2}m_\chi. \quad (11)$$

Отримана формула (10) дає змогу обчислити інтервал сітки для побудови ЦМР, коли значення ΔY в межах комірки сітки є меншим або рівним граничному. Якщо значення ΔY більші за $\Delta Y_{гран.}$, то розраховують кількість зон [Глотов В. М., 2009], в межах яких ΔY є допустимим:

$$n = \frac{\Delta Y}{2\Delta Y_{гран.}}, \quad (12)$$

де

$$\Delta Y = \Delta Y_{max} - \Delta Y_{min}, \quad (13)$$

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

Тоді інтервал сітки створеної ЦМР знайдемо за формулою:

$$a_{\text{зони}} = \frac{a}{n}. \quad (14)$$

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

$$k = k_x k_z, \quad (15)$$

де

$$k_x = \frac{L_x}{a} + 1; \quad (16)$$

$$k_z = \frac{L_z}{a} + 1, \quad (17)$$

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 .

Результати

Для підтвердження представленого алгоритму проведені експериментально-дослідницькі роботи. Вхідними даними слугували цифрові знімки виходів льодовиків Антарктич-

ного узбережжя, отримані протягом 2013 та 2014 років у сезонних наукових антарктичних експедиціях [Третяк К. Р., 2013]. Льодовики розташовані на островах Вінтер і Галіндез, поблизу української антарктичної станції "Академік Вернадський".

Наземне цифрове стереофотограмметричне знімання льодовиків виконувалось цифровою камерою Canon EOS 450D [Технічні характеристики Canon EOS 450D, 2015]. Для прикладу, представлено цифровий знімок західної сторони виходу льодовика на острові Галіндез, зроблений з лівої точки базису знімання (рис. 1). Розміри досліджуваних об'єктів наведено у табл. 1.

Апріорну оцінку точності визначення координат точок відповідно до вищевикладеного алгоритму обчислювали за формулами (1). Результати апріорної оцінки точності визначення фотограмметричних координат за нормального випадку знімання приведені у табл. 2. Для обчислень використовували такі параметри: $x_l = 11$ мм, $z_l = 7$ мм, $f = 18$ мм, $m_B = 5$ мм, $m_p = m_x = m_z = 0,005$ мм, $m_{\Delta\alpha} = m_{\Delta\omega} = m_{\Delta\chi} = 3''$.

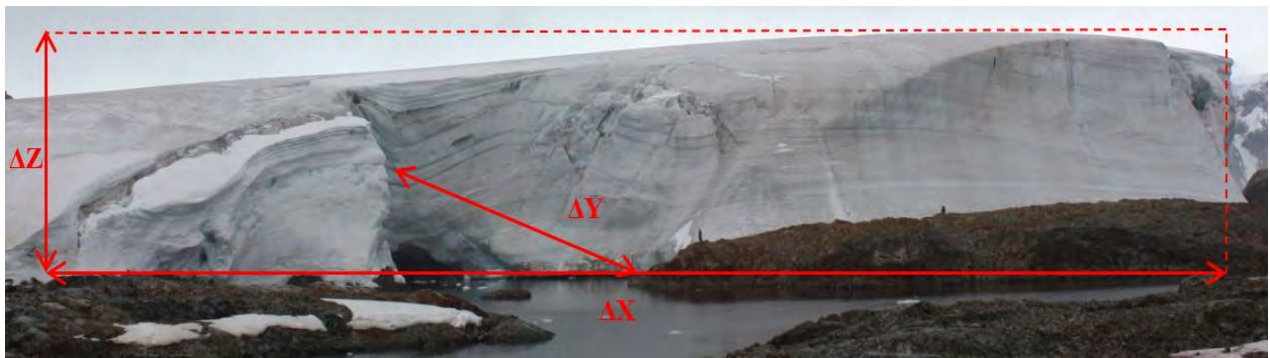


Рис. 1. Вихід західної частини льодовика на острові Галіндез та схематичне представлення його розмірів
Fig. 1. The western part of the glacier on Galindez Island and schematic presentation of its size

Таблиця 1

Розміри льодовиків

Table 1

The glaciers size

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

Таблиця 2

Визначення апріорної оцінки точності фотограмметричних координат за нормального випадку знімання

Table 2

Determination a priori accuracy of the photogrammetric coordinates at normal case

Об'єкт	B, м	Y _φ , м	Значення середніх квадратичних похибок		
			m _x , мм	m _r , мм	m _z , мм
Вихід західної частини льодовика на о. Галіндез	46	220	190	300	130
Вихід південної частини льодовика на о. Галіндез	10	75	103	166	67
Вихід південної частини льодовика на о. Вінтер	13,5	150	289	469	186

Таблиця 3

Обчислення граничної відносної похибки визначення глибини та площі об'єкта

Table 3

Calculation of permissible relative error of the determination object's depth and area

Назва об'єкта	M	r, мм	δ _{ΔY_{гxn}} , мм	δΔY _{гxn} , м	$\frac{m_{\Delta Y}}{\Delta Y}$ гxn, %	$\frac{m_s}{S}$ гxn, %
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						

Таблиця 4

Оптимальний інтервал сітки для побудови ЦМР для визначення об'єму об'єкта

Table 4

Optimal DEM grid spacing for determining the volume of object

Назва об'єкта	m _a , м	a, м	n	a _{зпт} , 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

Таблиця 5

Розрахунок щільності вузлів сітки

Table 5

Calculation of the mesh nodes density

Назва об'єкта	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

Граничну відносну похибку визначення глибини та площі об'єкта знайдемо за формулами (4), (6). Для обчислень прийемо, що допустима відносна похибка визначення об'єму становить 1 %. Результати обчислень наведено у табл. 3.

Користуючись формулами (10)–(14) обчислимо інтервал сітки для побудови ЦМР. Результати обчислення подано у табл. 4.

Визначивши інтервал сітки, знайдемо кількість вузлів сітки, в яких виконуватимуться виміри за формулами (15–17). Результати обчислення щільності вузлів сітки, наведено у табл. 5.

Наукова новизна та практична значущість

Вперше запропонований алгоритм оптимізації інтервалу сітки для побудови цифрової моделі рельєфу під час визначення об'єму льодовиків, який може застосовуватися і для інших досліджуваних об'єктів. Цей алгоритм дасть змогу ефективніше опрацьовувати матеріали цифрового наземного стереофотограмметричного знімання та отримувати значення об'ємів з необхідною точністю.

Висновки

1. Проаналізувавши літературні джерела, в яких розглянуто визначення кількісних параметрів об'єктів за їх цифровими моделями рельєфу потрібно зазначити, що в більшості досліджень для побудови ЦМР: вибирали характерні точки рельєфу; використовували регулярну сітку з інтервалом, встановленим експериментальним шляхом або ж з довільним інтервалом, який не обґрунтовано у працях.

2. Можна зробити висновок, що досі остаточно не розроблено методики розрахунку оптимального інтервалу сітки для побудови цифрової моделі рельєфу під час визначення об'ємів об'єктів що досліджуються, зокрема льодовиків.

3. Вперше запропонований алгоритм оптимізації інтервалу сітки для побудови цифрової моделі рельєфу під час визначення об'єму не тільки льодовиків, а й інших досліджуваних об'єктів.

4. Алгоритм дасть змогу значно зменшити час опрацьовування матеріалів цифрового наземного стереофотограмметричного знімання та

отримувати значення поверхневих об'ємів льодовиків з необхідною точністю.

5. Надалі планується побудувати ЦМР за матеріалами наземного цифрового стереофотограмметричного знімання льодовиків Антарктичного узбережжя, перевірити доцільність виконання додаткових вимірів (характерних точок, структурних ліній) та виконати апробацію запропонованого алгоритму на результатах наземного лазерного сканування вищевказаних льодовиків.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- Бурак К. Дослідження особливостей та точності побудови ЦМР за допомогою бікубічної сплайн-інтерполяції / К. Бурак, В. Ковтун, Р. Левицький, М. Ничвид // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2014 (28). – Вип. 2. – С. 32–36.
- Бурак К. Визначення щільності регулярної сітки бікубічної сплайн-інтерполяції при створенні ЦМР / К. Бурак, В. Ковтун, Р. Левицький // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2015. – Вип. 1 (29). С. 133–139.
- Бурштинська Х. Застосування кореляційно-спектрального аналізу для вибору інтервалу при побудові цифрової моделі рельєфу / Х. Бурштинська, О. Тумська, Д. Лелюх // Матеріали 2-ї Міжнародної науково-практичної конференції “Кадастр, фотограмметрія, геоінформатика – сучасні технології і перспективи розвитку”. – Львів–Краків, 2000. – С. 98–102.
- Вашук О. М. Обґрунтування методики підрахунку об'ємів складів готової продукції булощебеневної сировини / Вісник ЖДТУ. – 2012. – Вип. 4 (63). – С. 174–182.
- Глотов В. М. Кількісні параметри острівних льодовиків за результатами цифрового стереофотограмметричного знімання / В. М. Глотов, С. Б. Ковальонко, В. В. Чижевський // Український антарктичний журнал. – 2004. – Вип. 2. – С. 58–65.
- Глотов В. М. Априорна точність складання фронтальних планів методом сумісного використання лазерного сканування та наземного цифрового знімання / В. М. Глотов, К. Б. Смолій // Геодезія, картографія і аерофото-знімання. – 2009. – Вип. 72. – С. 65–68.
- Зазуляк П. М. Основи математичного опрацювання геодезичних вимірів : навч. посіб. / П. М. Зазуляк, В. І. Гавриш, Е. М. Євсєєва, М. Д. Йосипчук. – Львів : Растр-7, 2007. – 408 с.

- Карпінський Ю. О. Орографічно-триангуляційна цифрова модель рельєфу / Ю. О. Карпінський, А. А. Ляшенко // Вісник геодезії та картографії. – 2000. – Вип. 3. – С. 28–33.
- Катушков В. О. Прикладна фотограмметрія : навч. посіб. / В. О. Катушков, В. Г. Мархвіда, В. В. Пастух, Ю. М. Панкратьєв, В. М. Сердюков. – К. : ICDO, 1994. – 280 с.
- Марусаж Х. Аналіз сучасних методів дослідження кількісних параметрів льодовиків / Х. Марусаж // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2014. – Вип. I (27). – С. 109–117.
- Рассказова Н. С. Представление данных цифровых моделей рельефа в экологических геоинформационных системах: (на примере геоинформационной системы Шершневского водохранилища) / Н. С. Рассказова, А. В. Бобылев // Вестник Челябинского государственного университета. – 2010. – Вип. 8 (189). – С. 36–39.
- Технічні характеристики Canon EOS 450D [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.canon.ua/>
- Третяк К. Аналіз результатів моніторингу острівних льодовиків Антарктичного узбережжя цифровим стереофотограмметричним методом / К. Третяк, В. Глотов, Ю. Голубінка // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2013. – Вип. 2 (26). – С. 130–136.
- Третяк К. Р. Значення поверхневих об'ємів острівних льодовиків Антарктичного узбережжя як показник зміни кліматичних умов / К. Р. Третяк, В. М. Глотов, Ю. І. Голубінка // Український Антарктичний журнал. – 2013. – Вип. 12. – С. 69–82.
- Cahyono B. K. Landslide detection on slope area by using close-range photogrammetric data / B. K. Cahyono, A. N. Matori. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.researchgate.net/publication/266064995>.
- Cahyono B. K. Characterizing accuracy of DEM Derived from Close-Range Photogrammetric Data / B. K. Cahyono, A. N. Matori, D. Atunggal, A. Basith. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://repository.ugm.ac.id/id/eprint/93161>.
- Chandler J. Monitoring river channel change using terrestrial oblique digital imagery and automated digital photogrammetry / J. Chandler, P. Ashmore, C. Paola, M. Gooch // Annals of the Association of American Geographers. – 2002. – Vol. 92(4). – P. 631–644.
- Dai T. F. An optimized gravity terrain correction algorithm and test results from the Rio Tinto Valley, Spain / D. Ting-Fan, G. M. Hollyer. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.geosoft.com/resources>.
- Dyurgerov M. Reanalysis of Glacier Changes: From the IGY to the IPY, 1960–2008 / M. Dyurgerov // Материалы гляциологических исследований. – 2010. – Вип. 108. – С. 116.
- Hlotov V. Report on photogrammetric research conducted at the Antarctic station “Academician Vernadsky” / Alessandro Capra, Reinhard Dietrich (Eds.) // Geodetic and Geophysical Observations in Antarctica: An Overview in the IPY Perspective. – Berlin: Springer Berlin Heidelberg. – 2008. – P. 333–345.
- Karabork H. Investigation of accuracy for digital elevation models generated with different methods in photogrammetry / H. Karabork, F. Yildiz, E. Coskun, H. Yilmaz, M. Yakar // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 12–23 July, Istanbul, Turkey, 2004. – Vol. XXXV. – P. 156–161.
- Kaufmann V. Documentation of the retreat of Gössnitzkees and Hornkees glaciers (Hohe Tauern Range, Austria) for the time period 1997–2006 by means of aerial photogrammetry / V. Kaufmann., R. Ladstädter // Proceedings of the 6th ICA Mountain Cartography Workshop, 11–15 February, Lenk, Switzerland, 2008. – P. 115–123.
- Kaufmann V. Application of terrestrial photogrammetry for Glacier monitoring in alpine environments / V. Kaufmann., R. Ladstädter // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 3–11 July, Beijing, China, 2008. – Vol. XXXVII. – P. 813–818.
- Kienzle S. The effect of grid cell size on major terrain derivative / S. Kienzle // Proceedings: ESRI User Conference, 09–13 August, San Diego, CA, 2004. – P. 14
- Krimmel R. Mass balance and volume of South Cascade Glacier, Washington, 1958–1985. / R. Krimmel // Glacier fluctuation and climatic change. – 1989, Amsterdam: Kluwer Academic Publishers. – P. 193–206
- Matthews N. A. Aerial and close-range photogrammetric technology: providing resource documentation, interpretation, and preservation / N. A. Matthews // Technical Note 428, U.S. Department of the Interior, Bureau of Land Management, National Operations Center, Denver, Colorado. – P. 42.
- Sanz-Ablanedo E. Studying glacial melt processes using sub-centimeter DEM extraction and digital close-range photogrammetry / E. Sanz-Ablanedo, J.H. Chandler, T.D.L. Irvine-Fynn // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 25 August – 01 September, Melbourne, Australia, 2012. – Vol. XXXIX. – P. 435–440.

- Sokol S. Influence of the density of source data on a volume estimation using DEM / S. Sokol, M. Lip-tak, M. Bajtala // Inżynieria Mineralna, Polskie Towarzystwo Przeróbki Kopalni. – 2014. – Vol. 1. – P. 39–45.
- Triglav M. Measuring small glaciers in Slovenia: connecting geodetic measurements and non-metric imagery for glacier measurements / M. Triglav, M. Zorn. GIM international may 2013. – P. 24–27.
- Winkler M. Kilimanjaro ice cliff monitoring with close range photogrammetry / M. Winkler, W. T. Pfeffer, K. Hanke // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 25 August – 01 September, Melbourne, Australia, 2012. – Vol. XXXIX. – P. 441–446.
- Zemp M. Assessment of the status of the development of the standards for the Terrestrial Essential Climate Variables – T6 – Glaciers and Ice Caps / M. Zemp, I. Gärtner-Roer, W. Haeberli, M. Hoelzle, F. Paul // Global Terrestrial Observing System GTOS-61. – Rome. – 2009. – 17 p.

В. М. ГЛОТОВ¹, К. И. МАРУСАЖ^{2*}

¹ Кафедра фотограмметрии и геоинформатики, Национальный университет “Львовская политехника”, ул. С. Бандеры, 12, Украина, 79013, тел. +38 (032) 258-26-16, volodymma@mail.ru

² Кафедра фотограмметрии и геоинформатики, Национальный университет “Львовская политехника”, ул. С. Бандеры, 12, Украина, 79013, тел. +38 (098) 766-84-31, kh.marusazh@gmail.com

ОПТИМИЗАЦИЯ ИНТЕРВАЛА СЕТКИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ОБЪЕМОВ МАЛЫХ ЛЕДНИКОВ АНТАРКТИЧЕСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ

Цель. Среди методов получения данных для наблюдений за состоянием ледников можно выделить гляциологические, геодезические и фотограмметрические методы. Фотограмметрический метод, как известно, относится к дистанционным методам, следовательно, его применение для исследования данных объектов является, безусловно, целесообразным. Это в первую очередь объясняется тем, что отсутствует непосредственная необходимость работать на теле ледника, а это, как известно, очень опасно. Кроме этого точность определения объемов ледников по этому методу удовлетворяет требованиям гляциологов. Одной из достаточно весомых проблем при реализации стереофотограмметрического метода является технология построения цифровой модели рельефа поверхности выходов ледников. Важным этапом является выбор метода задания ЦМР. В случае построения ЦМР по регулярно размещенным узлам на сетке, одним из процессов является определение параметров сетки. Основной целью работы является оптимизация шага сетки, что позволит повысить эффективность и технологичность обработки данных. **Методика.** Для построения цифровой модели рельефа задается регулярная сетка с квадратной элементарной ячейкой. На размеры элементарной ячейки влияют такие величины как погрешности определения координат точек, длин линий, а также погрешности определения площади, глубины и объема ледника. Алгоритм определения оптимального шага сетки предусматривает следующие этапы работы: вычисление априорной оценки точности определения координат точек, учета допустимых относительных погрешностей определения объема, глубины и площади ледников и непосредственный расчет оптимального шага сетки. Априорная оценка точности определения координат точек является первым и обязательным этапом, поскольку среднеквадратичные погрешности определения фотограмметрических координат точек влияют на все последующие измерения и процессы. Вторым этапом является задание точности определения объема ледников. Принимается, что эта погрешность будет составлять 1%. Третий этап предполагает учет допустимой глубины объекта в пределах ячейки сетки. Четвертым этапом работы является вычисление допустимой относительной погрешности определения площади объекта через допустимые относительные погрешности определения объема и глубины. Последним – пятым, этапом является расчет шага сетки, который определяется как длина стороны элементарной ячейки сетки с учетом погрешностей площади и стороны ячейки. Исчисленный шаг также позволяет определить количество и плотность узлов сетки, в которых будут выполняться измерения на поверхности ледников. **Результаты.** Представлен алгоритм и предложена формула расчета оптимального шага сетки для построения ЦМР поверхностей выходов ледников. **Научная новизна.** Впервые предложен алгоритм оптимизации шага сетки цифровой модели рельефа при определении объема не только ледников, но и других исследуемых объектов. **Практическая значимость.** Данный алгоритм позволит значительно уменьшить время обработки материалов цифровой

наземной стереофотограмметрической съемки и получать значение поверхностных объемов ледников Антарктического побережья на островах Винтер и Галиндез с соответствующей точностью.

Ключевые слова: наземный цифровой стереофотограмметрических метод; наземные цифровые снимки; цифровая модель рельефа; шаг сетки; поверхностный объем ледника.

V. M. GLOTOV¹, KH. I. MARUSAZH^{2*}

¹ Department of Photogrammetry and Geoinformatics, Lviv Polytechnic National University, S. Bandera str., 12, Lviv, Ukraine, 79013, tel. 38 (032) 258-26-16, volodymmail@mail.ru

² Department of Photogrammetry and Geoinformatics Lviv Polytechnic National University, S. Bandera str., 12, Lviv, Ukraine, 79013, 79013, tel. 38 (098) 766-84-31, kh.marusazh@gmail.com

OPTIMIZING GRID SPACING FOR DEM CONSTRUCTION IN DETERMINING THE SURFACE VOLUME OF THE ANTARCTIC COAST ISLAND GLACIERS

Aim. Glaciological, geodetic and photogrammetric methods can be distinguished between methods of obtaining data for observations of glaciers. Photogrammetric method refers to the remote sensing methods, so its application for the study of these objects is definitely more reasonable. This is primarily conditioned by the fact that there is no need to work on the body of the glacier, which is very dangerous. In addition, the accuracy of the glaciers volume is satisfies of the glaciologist requirements by this method. The technology of digital surface model constructing of surface glaciers is a fairly significant problem in the implementation stereophotogrammetric method. The choice of DEM setting method is an important step. Defining the parameters of the grid is one of the processes in the case constructing DEM by regular placing grid nodes. The main aim is to optimize grid spacing that will help improve efficiency and adaptability to data processing. *Methods.* The regular grid with square elementary cell is set to build a digital surface model. Such values as: error of the determining coordinates of points, lengths of lines and error of the area determination, depth and volume of the glacier influence of the elementary cell size. The algorithm for determining the optimal grid spacing involves the following steps: calculating a priori accuracy of the coordinates of points, determining permissible relative errors of glaciers volume, depth and area and calculation of the optimal grid spacing. A priori accuracy of the points coordinates determination the first and obligatory step. Whereas the mean square errors of the determining photogrammetric coordinates of points influence on all following measurements and processes. The second step is setting accuracy of the glaciers volume determination. It is assumed that this error is 1%. The third stage involves consideration the permissible depth of object in a grid cell. The fourth stage of work is calculation of permissible relative error area determination considering relative permissible error and depth of object. The last – fifth step is to calculate the grid spacing. It is defined as the length of the elementary grid cell, taking into account the errors of the areas and side of grid cell. The calculated step can also determine the number and density of grid nodes in which measurements performed on the glaciers surface. **Results.** The algorithm and the proposed formula for calculating the optimum grid spacing for building DSM of glaciers outputs surfaces. **Scientific innovation.** For the first time proposed algorithm of optimization grid step of digital surface model in determining volume of glaciers, and other objects. **The practical significance.** This algorithm will significantly to reduce the time for digital terrestrial stereophotogrammetry data processing and to obtain the value of the surface volume of the Winter and Galindez island glaciers of the Antarctic coast with the corresponding accuracy.

Keywords: terrestrial digital photogrammetric method; terrestrial digital images; digital surface model; grid spacing; surface volume of the glacier.

REFERENCES

- Burak K., Kovtun V., Levycykj R., Nychvyd M. *Doslidzhennja osoblyvostej ta tochnosti pobudovy CMR za dopomoghoju bikubichnoji splajn–interpoljaciji* [Research of the accuracy and DEM construction using bicubic spline interpolation]. *Zb. nauk. pr. "Suchasni dosjaghennja gheodezychnoji nauky ta vyrobnyctva"* [Modern achievements in geodetic science and industry]. Lviv, Lviv Polytechnic Publishing House, 2014, vol. 2 (28), pp. 32–36.
- Burak K., Kovtun V., Levycykj R. *Vyznachennja shhilnosti rehuljarnoji sitky bikubichnoji splajnterpoljaciji pry stvorenni CMR* [Determination of the density of a bicubic spline interpolation regular grid when creating DEM]. *Zb. nauk. pr. "Suchasni dosjaghennja gheodezychnoji nauky ta vyrobnyctva"* [Modern achievements in geodetic science and industry]. Lviv, Lviv Polytechnic Publishing House, 2015, vol. 1 (29), pp. 133–139.

- Burshtynska H., Tumska O., Leljuh D. *Zastosuvannja korelacijsno-spektralnogo analizu dlja vyboru intervalu pry pobudovi cyfrovoy modeli re'jefu* [The use of correlation-spectral analysis to select the interval at construction digital elevation model]. *Materialy 2-i Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferencii "Kadastr, fotogrammetrija, geoinformatyka – suchasni tehnologii i perspektyvy rozvytku"* [Materials 2nd International Scientific Conference "Cadastre, photogrammetry, geoinformatics – modern technology and development prospects]. Lviv-Krakiv, 2000, pp. 98–102.
- Vashhuk O. M. *Obgruntuvannja metodyky pidrakhunku ob'jemiv skladiv ghotovoji produkciji butoshhebenevoji syrovyny* [Rationale methodology calculation of volumes of warehouses finished product of crushed stone materials]. *Visnyk ZhDTU* [Journal of Zhytomyr State Technological University]. Zhytomyr, 2012, vol. 4 (63), pp. 174–182.
- Ghlotov V. M., Kovaljonok S. B., Chyzhevsjkyj V. V. *Kiljkisni parametry ostrivnykh ljodovykiv za rezul'tatamy cyfrovogho stereofotogrammetrychnogho znimannja* [Numerical parameters of island glaciers obtained using digital stereophotogrammetry]. *Ukrajinsjkyj antarktychnyj zhurnal* [Ukrainian Antarctic Journal]. Kyiv, 2004, vol. 2, pp. 58–65.
- Ghlotov V.M. Smolij K.B. *Apriorna tochnistj skladannja frontalnykh planiv metodom sumisnogho vykorystannja lazernogho skanuvannja ta nazemnogho cyfrovogho znimannja* [A priory accuracy of drawing up front plans by simultaneously using laser scanning and terrestrial digital capture]. *Visnyk "Gheodezija, kartografija i aerofoto-znimannja"* [Geodesy, Cartography and Aerial Photography]. Lviv, Lviv Polytechnic Publishing House, 2009, vol. 72, pp. 65–68.
- Zazuljak P. M., Gavrysh V. I., Jevsjejeva E. M., Josypchuk M. *Osnovy matematychnogo opracjuvannja geodezychnyh vymiriv: Navchal'nyj posibnyk* [Fundamentals of mathematical processing of geodetic measurements]. Lviv: Pub. "Rastr-7", 2007. 408 p.
- Karpinskyj Ju. O., Ljashhenko A. A. *Orografichno-trianguljacijsna cyfrova model reljefu* [Orography-triangulation digital elevation model]. *Visnyk geodezii ta kartografii* [Journal of Geodesy and Cartography]. 2000, Vol. 3, pp. 28–33.
- Katushkov V. O., Markhvida V. Gh. Pastukh V.V., Pankratjjev, Serdjukov V.M. *Prykladna fotogrammetrija: Navch. posibnyk* [Applied photogrammetry]. Kyiv, 1994, 280 p.
- Marusazh Kh. *Analiz suchasnykh metodiv doslidzhennja kiljkisnykh parametriv ljodovykiv* [Analysis of modern methods of research quantitative parameters of glaciers]. *Zb. nauk. pr. "Suchasni dosjaghnennja gheodezychnoji nauky ta vyrobnyctva"* [Modern achievements in geodetic science and industry]. Lviv, Lviv Polytechnic Publishing House, 2014, vol. 1 (27). pp. 109–117.
- Rasskazova N. S., Bobilev A. V. *Predstavlenye dannyh cyfrovyh modelej relefa v ekologycheskyh geoinformacyonnyh systemah: (na prymerе geoinformacyonnoj systemy Shershnevskogo vodohranylyshha)* [Presentation of data in the digital terrain models of environmental information systems: (for example geographic information system Shershnevskoye reservoir)]. *Vestnyk Cheljabynskogo gosudarstvennogo unyversyteta* [Bulletin of the Chelyabinsk State University]. 2010, Vol. 8 (189), pp. 36–39.
- Tekhnichni kharakterystyky Canon EOS 450D* [Technical characteristic of Canon EOS 450D], Mode of acces: <http://www.canon.ua>
- Tretjak K., Ghlotov V., Gholubinka Ju. *Analiz rezul'tativ monitoryngu ostrivnykh ljodovykiv Antarktychnogho uzberezhzhja cyfrovym stereofotogrammetrychnym metodom* [The monitoring analysis of the Antarctic island glaciers laser scanning and digital photogrammetry measurements]. *Zb. nauk. pr. "Suchasni dosjaghnennja gheodezychnoji nauky ta vyrobnyctva"* [Modern achievements in geodetic science and industry]. Lviv, Lviv Polytechnic Publishing House, 2014, vol. 2 (26). pp.130–136.
- Tretjak K.R., Ghlotov V. M., Gholubinka Ju. I. *Znachennja poverkhnevnykh ob'jemiv ostrivnykh ljodovykiv Antarktychnogho uzberezhzhja jak pokaznyk zminy klimatychnykh umov* [The importance of surfactant volumes of islands glaciers of Antarctic coast like climate changes indicator]. *Ukrajinsjkyj Antarktychnyj zhurnal* [Ukrainian Antarctic Journal]. Kyiv, 2013. vol.12. pp. 69–82.
- Cahyono B. K. *Landslide detection on slope area by using closerange photogrammetric data* B. K. Cahyono, A. N. Matori. [Web source]. Mode of acces: <http://www.researchgate.net/publication/266064995>.
- Cahyono B. K., Matori A. N., Atunggal D., Basith A. *Characterizing accuracy of DEM Derived from CloseRange Photogrammetric Data* B. K. Cahyono. [Web source]. Mode of acces: <http://repository.ugm.ac.id/eprint/93161>.
- Chandler J., Ashmore P., Paola C., Gooch M. *Monitoring river channel change using terrestrial oblique digital imagery and automated digital photogrammetry*. *Annals of the Association of American Geographers*, 2002, vol. 92(4), pp. 631–644.

- Dai T. F., Hollyer G. M. An optimized gravity terrain correction algorithm and test results from the Rio Tinto Valley, Spain. [Web source]. Mode of acces: <http://www.geosoft.com/resources>.
- Dyrgerov M. Reanalysis of Glacier Changes: From the IGY to the IPY, 1960-2008. Materials of glaciological studies. Moscow, 2010. vol. 108, pp. 116.
- Hlotov V. Report on photogrammetric research conducted at the Antarctic station "Academician Vernadsky" Alessandro Capra, Reinhard Dietrich (Eds.). Geodetic and Geophysical Observations in Antarctica: An Overview in the IPY Perspective. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 333–345.
- Karabork H., Yildiz F., Coskun E., Yilmaz H., Yakar M. Investigation of accuracy for digital elevation models generated with different methods in photogrammetry. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 12-23 July, Istanbul, Turkey, 2004, vol. XXXV, pp. 156–161.
- Kaufmann V., Ladstädter R. Documentation of the retreat of Gössnitzkees and Hornkees glaciers (Hohe Tauern Range, Austria) for the time period 1997-2006 by means of aerial photogrammetry. Proceedings of the 6th ICA Mountain Cartography Workshop, 11-15 February, Lenk, Switzerland, 2008, pp. 115–123.
- Kaufmann V., Ladstädter R. Application of terrestrial photogrammetry for Glacier monitoring in alpine environments. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 3-11 July, Beijing, China, 2008, vol. XXXVII, pp. 813–818.
- Kienzle S. The effect of grid cell size on major terrain derivative. Proceedings: ESRI User Conference, 09-13 August, San Diego, CA, 2004, p. 14.
- Krimmel R. Mass balance and volume of South Cascade Glacier, Washington, 1958-1985. R. Krimmel Glacier fluctuation and climatic change, 1989, Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, pp. 193–206.
- Matthews N. A. Aerial and close-range photogrammetric technology: providing resource documentation, interpretation, and preservation. Technical Note 428, U.S. Department of the Interior, Bureau of Land Management, National Operations Center, Denver, Colorado, p. 42.
- Sanz-Ablanedo E., Chandler J.H., Irvine-Fynn T.D.L. Studying glacial melt processes using subcentimeter DEM extraction and digital close-range photogrammetry. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 25 August 01 September, Melbourne, Australia, 2012, vol. XXXIX, pp. 435–440.
- Sokol S., Liptak M., Bajtala M. Influence of the density of source data on a volume estimation using DEM. Inżynieria Mineralna, Polskie Towarzystwo Przeróbki Kopaliny. 2014, vol 1, pp. 39–45.
- Triglav M., Zorn M. Measuring small glaciers in Slovenia: connecting geodetic measurements and nonmetric imagery for glacier measurements. GIM international may, 2013, pp. 24–27.
- Winkler M., Pfeffer W. T., Hanke K. Kilimanjaro ice cliff monitoring with close range photogrammetry. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 25 August 01 September, Melbourne, Australia, 2012, vol. XXXI, pp. 441–446.
- Zemp M., Gärtner-Roer I., Haeberli W., Hoelzle M., Paul F. Assessment of the status of the development of the standards for the Terrestrial Essential Climate Variables T6 Glaciers and Ice Caps. Global Terrestrial Observing System GTOS-61. Rome, 2009, 17 p.

Надійшла 05.11.2015 р.