

УДК 528.32

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ КІЛЬКІСНИХ ПАРАМЕТРІВ ЛЬОДОВИКІВ

Х. Марусаж

Національний університет "Львівська політехніка"

Ключові слова: льодовики, методи спостережень.

Постановка проблеми

Льодовики відіграють значну роль у географічній оболонці Землі. Вони істотно впливають на рельєф, кліматичні й погодні умови. Гідрологічна роль льодовиків полягає в перерозподілі стоку атмосферних опадів упродовж року й у згладжуванні коливань річних водотоків. Найважливіше значення льоду для клімату планети пов'язано з його високою відбивною здатністю. Завдяки цьому відбувається істотне охолодження поверхні на величезних територіях. Тобто льодовики – не тільки неocenенні фонди прісної води, але і джерела охолодження Землі.

Окрім сприятливого впливу, льодовики можуть спричинити небажані процеси, явища і надзвичайні ситуації.

Спостереження за динамікою змін льодовиків дасть змогу виявити і передбачити майбутні кліматичні, гляціологічні та біологічні зміни, що відбуваються на планеті [4].

Зв'язок із важливими науковими й практичними завданнями

Процеси, що відбуваються в атмосфері, кріосфері та гідросфері, пов'язані з процесами в інших частинах планети і впливають на глобальний клімат.

Проаналізувавши матеріали останніх метеорологічних і гляціологічних спостережень у різних місцях земної кулі, можна стверджувати, що спостереження за льодовиками є лише частиною масових досліджень, які сприяють встановленню тенденції глобальних кліматичних змін на усій планеті.

Невирішені частини загальної проблеми

Для спостережень за станом льодовиків використовують як традиційні гляціологічні методи, так і геодезичні та методи дистанційного зондування. Однак досі остаточно не розроблено технологічної схеми, яка б істотно підвищила швидкість виконання вимірювань та точність отримання кількісних параметрів об'єктів дослідження, зокрема зміни поверхонь льодовиків.

Постановка завдання

Виконати критичний аналіз літературних джерел, в яких висвітлено технологічні аспекти та методики спостережень за станом льодовиків, і зробити відповідні висновки з метою подальшого розроблення оптимальної технологічної схеми.

Виклад основного матеріалу

Вплив льодовиків виходить за межі районів їх поширення. Сучасне материкове зледеніння прямо й опосередковано позначається на природі географічної оболонки Землі. Це виявляється у співвідношенні

суші та моря, яке залежить від змін об'єму льоду. Зледеніння впливає на клімат планети, охолоджуючи її, знижує середні температури повітря південної півкулі і планети загалом, посилює термічну зональність на Землі. Зміна маси льодовиків істотно впливає на гравітаційне поле, швидкість обертання Землі, тривалість дня [6].

Для виявлення і передбачення майбутніх кліматичних, гляціологічних та біологічних змін, що відбуваються на Землі, необхідно дослідити динаміку зміни кількісних параметрів льодовиків.

Для вирішення таких завдань зазвичай застосовують гляціологічні, геодезичні методи та методи дистанційного зондування.

Розглянемо детальніше кожен з цих методів.

Використання гляціологічного методу висвітлено в роботах [6, 7, 11, 13, 14, 24]. Цей метод ще називають прямим, традиційним або ж методом "забурених" рейок [11]. Методику застосування такого підходу для моніторингу льодовиків Аляски описано в публікації [13]. Виміри виконують за допомогою рейок, які забурюють в поверхню льоду на початку і в кінці сезону спостережень. Визначають глибину снігу або льоду, що накопився чи зменшився в кожній точці мережі, і множать на щільність снігу або льоду для обчислення балансу маси в цій точці. Отримані значення інтерполюють, щоб отримати дані для всієї поверхні льодовика.

Проектна мережа складається зі станцій, що охоплюють весь льодовик і розподілені рівними інтервалами висот (нерівні по горизонталі). Проте зауважимо, що у багатьох випадках матеріально-технічні обмеження дають змогу розташовувати станції лише уздовж середньої лінії льодовика.

Під час дослідження рейки встановлювали на льодовику, просвердливши отвори (2–4 см у діаметрі і до 10 м в глибину) за допомогою парового дреля або ручного бура. Координати кожного пікета отримано з використанням приймача GPS.

Значення абляції визначено за допомогою рулетки на початку і в кінці року.

У публікації [6] представлені результати аналізу характеристик режимів льодовиків (зміни площ, об'ємів тощо). Для визначення абляції льодовикових покривів використано гляціологічний метод "забурених" рейок.

Проаналізовано всі льодовики Землі, зокрема 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.

Проаналізувавши ці праці, можна зробити висновок, що використання гляціологічних методів для спостережень за станом льодовиків потребує багато

часу на безпосереднє проведення польових досліджень, а також аналіз та статистику отриманих даних. Окрім того, метод неможливо використовувати у важкодоступних місцях на поверхні льодовика.

Застосування геодезичного методу для моніторингу льодовиків розглянуто в роботах [11, 13, 14, 24, 26]. Підхід полягає у виконанні тахеометричного знімання, спостережень за допомогою GPS-приймачів або ж використанні картометричного методу [14]. Зміну об'єму льодовиків можна оцінити, врахувавши висоту поверхні та розміри льодовика за два різні моменту часу. Знаючи поверхневу щільність в різних частинах льодовика, можна отримати дані щодо зміни маси.

У роботі [13] запропоновано методику застосування GPS-спостережень для визначення зміщень та площі льодовиків Національного парку Аляски. Технологічна схема моніторингу за допомогою GPS-приймача передбачала такі етапи: польові виміри, постопрацювання та геоінформаційний аналіз даних. Спостереження виконували як у статичному, так і в кінематичному режимі. Після отримання даних їх завантажували на комп'ютер і диференційно коригували. Наступним етапом був імпорт даних в геоінформаційну систему (ГІС) для перевірки та оцінки точності результатів. Будь-які точки, які відхилялися від загальної тенденції, були проаналізовані та пізніше вилучені з набору даних. ГІС також використовували для порівняння положень виходів льодовиків.

Проаналізувавши вищезгадані роботи, потрібно зазначити, що такі методики передбачають помірний рівень підготовки виконавців і незначний обсяг коштів. Проте це дуже трудомісткий і неефективний, а з погляду охорони праці здебільшого небезпечний метод моніторингу великих льодовиків. Також варто зазначити, що сьогодні геодезичний метод застосовують переважно для допоміжних вимірювань, наприклад, для забезпечення геодезичної мережі.

Для моніторингу льодовиків широко використовують такі методи дистанційного зондування, як аерознімання, повітряне лазерне сканування, космічне та радарне знімання.

Використовувати архівні аерофотознімки для дослідження змін Антарктичного півострова запропоновано у публікації [19]. Для частини півострова ці дані є єдиним способом відновити зміни поверхні льодовика протягом останніх п'ятдесяти років. Проте отримання інформації з історичних знімків не є простим завданням і це джерело даних досі практично не використовується, незважаючи на його багатий потенціал. Часто такі зображення представлені на фотопапері та 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 (ЦМР), що негативно впливає на результати наступних вимірювань.

Ці недоліки виправлено з використанням методу найменших квадратів. Історичні зображення обробляють для побудови ЦМР, а пізніше порівнювали їх в програмному пакеті (ПП) ENVI з ЦМР, отриманою за допомогою сучасних супутникових даних ASTER. У роботі наголошено, що відповідний підхід підвищив точність реєстрації архівних і сучасних наборів даних.

Зауважимо, що основними обмеженнями в таких дослідженнях є якість зображення історичних знімків та використання знімків на фотопапері. Проте результати допомагають зрозуміти історичні зміни обсягів льодовиків.

Один з методів підрахунку балансу мас льодовиків ґрунтується на використанні високоточних ЦМР, отриманих методами дистанційного зондування. У праці [12] пропонується поєднання даних аерофотознімання та лазерного сканування. За знімками побудовано ЦМР для визначення балансу льодовикових мас західного Свартісену (Норвегія) в періоди 1968–1985 і 1985–2002 рр. Основні труднощі полягали у визначенні та розпізнаванні опорних точок. Додаткові недоліки спричинені відсутністю даних про танення, щільність та товщину фірну.

Використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) як альтернативний варіант отримання даних для моніторингу льодовиків висвітлено у публікаціях [28, 31]. Зміни навколишнього середовища внаслідок глобального потепління клімату особливо чітко простежуються в полярних регіонах, і ці регіони є ключем до розуміння процесів, що викликають зміни та їх наслідки для нашої планети. Однак полони є важкодоступними місцями для спостережень. Одна з основних проблем для полярних дослідників – недостатня кількість даних, оскільки в цій області діють лише кілька постійних науково-дослідних станцій. Супутникові дані для полярного регіону мають певні обмеження. Відповідно супутникового покриття на полюсах недостатньо, а застосування методу аерознімання в таких умовах є дорогим і в багатьох випадках дуже небезпечним через характер знімань (мала висота, погана погода). Це істотно обмежило використання повітряних суден у полярних дослідженнях в минулому.

У статтях зосереджено увагу на використанні БПЛА, що дасть можливість неперервних вимірювань льодовиків. За період досліджень виконано п'ять проектів. Проте варто зазначити, що для жодного з п'яти проектів конкретної технології не представлено.

У роботі [30] досліджено можливість застосування БПЛА для вимірювання важкодоступних льодовиків Шпіцбергена. Висотний профіль льодовика отримано за допомогою системи, що складається з лазерного висотоміра FAE-LS1501 в поєднанні з високоточним двочастотним GPS приймачем. Вихід льодовика відображається з використанням цифрової камери, знімки з якої оброблено 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. Визначення опорних точок теж мало важливе значення для створення ЦМР. Вимірювання повинні бути виконані переважно в сітці охоплення відомих точок, розташованих на бічних моренах з обох сторін льодовика.

Потрібно наголосити, що у цій роботі використано лазерний висотомір, що працював в надто короткому діапазоні, а висоти поверхні були достатньо низькі. Це спричинило труднощі під час реєстрації даних. Тобто важливим етапом дослідження є ознайомлення з харак-

тером місцевості, що зніматиметься, і вибір обладнання з відповідними технічними характеристиками.

Аналізуючи вищезгадані праці, можна зробити висновок, що БПЛА може бути цінним інструментом та єдиною реальною альтернативою аерозніманню для вимірювання льодовиків у віддалених районах. Отримані дані з повторних спостережень протягом деякого періоду у поєднанні з 3D-моделюванням можна використати для оцінки швидкості втрат динамічної маси. Такі дані цінні, особливо для льодовиків, що виходять в море, та пульсуючих льодовиків.

Застосування методу космічного знімання висвітлено в працях [17, 20, 23, 36]. Моніторинг льодовиків Монголії як індикаторів кліматичних мінливостей і одних з найважливіших прісноводних ресурсів описано у праці [17]. Дослідження ґрунтувалось на застосуванні даних MODIS snow product для визначення області снігового покриву льодовиків. Для порівняння використано інформацію із супутникової системи Landsat. Виконавці підкреслюють, що для отримання інформації про баланс снігового, льодового покриву та водних ресурсів необхідно досліджувати не тільки супутникові та наземні дані, але й аналізувати кліматичні дані, забезпечуючи синергетичний ефект.

Моніторинг льодовикових змін стає все важливішим з очевидною тенденцією до глобального потепління. У роботі [20] один з найбільших льодовикових покривів на планеті, розміщений у Південній Патагонії, був нанесений на карту за допомогою набору зображень знімальної апаратури ETM+ космічного апарата Landsat 7, отриманих в 1973, 1976, 1979, 1986, 2005 і 2009 роках. Зображення були відкалібровані від радіовипромінювань космічних об'єктів та їх відбивної здатності. Контрольована класифікація кожного зображення дала змогу розпізнати фізичні межі снігу з льодовиком.

Карти створено з відміченими положеннями виходів льодовика. Результати порівнювалися з попередніми публікаціями Геологічної служби США і показали неоднозначну поведінку кожного з льодовиків.

Зазначимо, що отримані дані не дають можливості прогнозувати подальші тенденції змін льодовика.

У статті [36] представлено методологію визначення зміни об'єму льодовиків в області Геладандонг (Тибетське нагір'я). Для дослідження використано ЦМР за топографічними та SRTM даними, супутникові знімки ICESat, GLAS і Landsat 5. За допомогою зображень з Landsat, отриманих у 2000 і 2007 роках, визначали площі льодовиків за цими датами; за ЦМР та SRTM обчислено зміни товщини льодовиків. Для коригування даних SRTM застосовано дані з ICESat та GLAS. Зміну об'єму льодовиків визначали, поєднуючи результати зміни площ та перепадів висот.

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

Використання оптичних супутникових знімків для моніторингу льодовиків Ірану описано у статті [23]. Для дослідження вибрано знімки із супутникових систем

SPOT 5 (2003 р.) і Quickbird (2005 р.). В роботі запропоновано метод взаємної кореляції оптичних зображень.

Потрібно зазначити, що в процесі виконання дослідження виникали труднощі, пов'язані з відображенням схилів поверхні льодовика, наявністю тіней та інших шумів на зображеннях.

Радарні методи спостережень ґрунтуються на використанні відбитих від земних об'єктів хвиль у мікрохвильовому діапазоні. Застосування такого підходу розглянуто у статті [37]. Дослідження виконано з використанням PCA (радіолокаційних систем із синтезованою апертурою), оптичних та альтиметричних даних для виявлення зміни поверхні та швидкості руху льодовика в горах Гров (Антарктика). Автори підкреслюють, що досі важко отримати ЦМР всього масиву гір, який становить близько 8000 кв. м, тому що поверхня є похилою та виникають похибки у визначенні базової лінії.

Необхідно зазначити, що застосована в роботі методика дає змогу обчислювати параметри льодовиків за окремими джерелами даних та проводити моніторинг обширних територій, а також класифікувати поверхню льодовиків. Однак технологічна схема сумісного використання даних ще не опрацьована.

У статті [10] описується визначення площі поверхні льодовика Таку (Аляска) за допомогою космічних PCA. 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.

Зазначимо, що вдалось класифікувати не всю поверхню льодовика, що пов'язано з виникненням шумів та недостатньою кількістю інформації в деяких зонах знімків. Також варто зауважити, що до знімків застосовували наближений метод обробки, тому в результаті розраховано наближену площу.

Точний моніторинг льодовика має важливе значення для оцінки глобальних екологічних змін. У працях [32, 35] використано знімки інтерферометричних PCA для отримання інформації про поверхню льодовика. Основними цілями було виправити спотворення, притаманні зніманню PCA у пересіченій місцевості, й зобразити варіації руху льодовика. У роботі [32] 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 [35] для моніторингу льодовикових змін біля ріки Янцзи (Китай) аналізували зображення на основі матриці суміжності рівня сірого. Оцінювали такі параметри, як середнє, дисперсія, однорідність, контраст, неподібність, ентропія та кореляція.

Проаналізувавши ці публікації, можна зробити висновок, що PCA мають великий потенціал у галузі моніторингу льодовиків. Проте на результати досліджень впливає такий фактор, як контраст узгодженості між льодовиком і нельодовиковими областями. Тобто

коли така відмінність не є очевидною, потрібен інший підхід, щоб отримати дані з необхідною точністю.

Застосування даних поляриметричних РСА (PolSAR) для моніторингу льодовиків запропоновано у публікації [8]. Автори зазначають, що, незважаючи на останні дослідження з моніторингу льодовиків, потенціал поляриметрії достатньо мірою не використано через складний механізм лід/сніг. У статті запропоновано новий підхід до питання моніторингу льодовиків за допомогою зображень PolSAR, з використанням основних концепцій з теорії взаємної інформації. Запропонований метод застосовує цю теорію для отримання статистичної залежності між поляриметричними зображеннями.

Потрібно зауважити, що точність отримання даних в роботі не зазначається.

Застосування методу лазерного сканування повітряного базування поверхні льодовиків розглянуто у дослідженнях [18, 38]. У роботі [38] сканування льодовика виконували з гелікоптера у високогірних районах Альп. Пропонується поєднання даних аерофотознімання і лазерних систем повітряного базування (ЛІДАР) для покращення ЦМР. Для дослідження використано аерофотознімки (1956–2001 рр.) та матеріали лазерного сканування (2005–2007 рр.). Опрацювання знімків виконано в ПП Leica Photogrammetry Suite, а лідарних даних за допомогою програмного забезпечення SCOP++. Розрізнення отриманих ЦМР становило 2 м за результатами аерофотознімання та 1 м для даних лазерного сканування.

У публікації [18] описано новий підхід до моніторингу льодовика в Південному Тіролі (Італія) на основі ЛІДАР спостережень у період 2005–2006 рр. За отриманими даними будували ЦМР. Розрізнення цифрової моделі становило 2,5 м. Використовуючи результати попередніх досліджень (з 1997 р.), визначали зміни площ, об'ємів та зміщення льодовика.

Проаналізувавши ці роботи, наголосимо, що використання лазерних систем повітряного базування для моніторингу льодовиків є перспективним методом. Нині під час сканування виникає ряд похибок, які ще не вдалось усунути. Це пов'язано з тим, що лазерні промені відбиваються від льодовикової поверхні, особливо в гірських районах, та виникають "мертві" зони на зображеннях. Дані про поверхню льодовика втрачаються переважно у місцях, які покриті снігом або глибокими тріщинами.

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

Застосування методу наземного цифрового знімання для визначення кількісних характеристик льодовиків архіпелагу Аргентинські острови запропоновано в публікаціях [1–3]. Польові вимірювання передбачали такі етапи: рекогностування ділянки та складання робочого проекту; 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 в опрацюванні цифрових знімків на цифровій фотограмметричній станції (ЦФС) Дельта-2.

Автори акцентують на тому, що під час виконання дослідження виникали труднощі у маркуванні опорних точок, особливо на виходах льодовиків. Частково задачу розв'язували 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 поверхневого об'єму в нормальному випадку знімання дорівнювала 0,1 %.

Проаналізувавши ці праці, можна зробити висновок, що запропонована технологічна схема визначення поверхневих об'ємів льодовиків дає змогу оперативно і з необхідною точністю розв'язати задачу визначення змін об'єму як методом пікетів, так і методом вертикальної сітки. Цифрове знімання із застосуванням способу вертикальної сітки дає змогу визначити кількісні параметри льодовиків без додаткових геодезичних вимірів, але у випадку рівновідхилених знімків необхідно виконувати їх трансформування.

Використання НЦЗ для моніторингу скельних льодовиків розглянуто в публікаціях [15, 16]. Пропонується використання дешевих цифрових камер та потужного програмного забезпечення. Таке поєднання розглянуто на практичному прикладі досліджень [15] 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. Для всієї області з високою точністю визначено тривимірні вектори руху, щоб виявити просторово-часові зміни швидкості потоку льоду.

У роботі [16] 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 вибирали так, щоб отримати максимально великомасштабні зображення із захопленням загальної кількості контрольних точок. Аналогові знімки оцифровано за допомогою програмного пакета (ПП) UltraScan 5000. Знімки опрацьовували методом фототріангуляції з використанням координат опорних точок, отриманих за допомогою GPS-приймача. Середньоквадратичні похибки (СКП) лежали в діапазоні від ± 10 см до ± 20 см. Варто підкреслити, що вони характеризують точність визначення висоти поверхні й залежать від випадкових похибок під час орієнтування та візуального сприйняття поверхні, оскільки подекуди льодовик покритий брудом та камінням, що ускладнює роботу оператора.

Вплив цих ефектів можна зменшити, порівнюючи фотограмметричні профілі, отримані з різних камер того самого періоду. Обов'язковою умовою під час

порівняння даних є використання стабільних, встановлених на нерухому поверхню пунктів.

Зміну товщини льоду розраховували, будуючи 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 $\pm 10\%$.

Перевагами таких методик є легкість збору даних за порівняно обмеженої кількості персоналу, необхідного для виконання польових робіт. Проте процес фотограмметричного опрацювання даних потребує досвідчених операторів.

Доцільність використання цифрової фотограмметрії підтверджено у роботі [34] під час моніторингу за льодовим шпилем Кіліманджаро. НЦЗ виконано камерою Nikon D2X DSLR, а тахеометричне знімання – тахеометром Leica TCRA 1101 для забезпечення місцевої системи координат. За побудованою ЦМР у ПП PhotoModeler обчислювали зміщення льодового покриву шпилью для різних періодів часу (з інтервалом 223, 142 і 223 дні), що пов'язано з дією сонячного випромінювання на поверхню Землі.

Зауважимо, що запропонований метод можна успішно застосувати для проектів довгострокового моніторингу, але тільки малих льодовиків або окремих областей льодовика.

Використання знімальних камер для визначення швидкості зміни льодовикової маси розглянуто у статтях [9, 33]. В обох працях дослідження виконували за допомогою двох цифрових камер, призначених для отримання зображень поверхні льодовика у двох різних напрямках для певного періоду. У роботі [33] отримано серії зображень з двох камер Canon XTі 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 становила 0,57 м (східний напрям) та 3,5 м (західний напрям).

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 у реалізації технологічної схеми виникали труднощі, пов'язані зі зміною кутів орієнтування камери. Також отримана точність не відповідала зазначеним вимогам. Для зменшення впливу таких факторів варто використовувати постійні опорні точки, відкалібровані камери та точні ЦМР.

Метою дослідження [9] 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 використано метод кореляції пар зображень, отриманих з різних камер. Швидкість зміни льодовикової маси обчислено в см/день за двома конкретними точками на парах знімків.

Це дослідження є доволі перспективним, проте вектори зсуву були виражені тільки в двовимірному просторі. Крім того, глобальна зміна швидкостей визначалась як піксел/день, оскільки відстань між камерою і місцевістю була невідомою.

Чутливість льодовиків до коливань клімату та вивчення впливу кріоконіту на процес танення льодовиків описано у публікації [27]. Для дослідження використано ЦМР, побудовану на субсантиметровому та мікрорівнях. Такі детальні поверхні дали змогу розглянути зв'язок між властивостями кріоконіту та поверхнею льоду, а також дослідити їх у просторі та часі. Польові вимірювання проводилися в Шпіцбергені протягом літа 2010 р. Для їх виконання використано 5-мегапіксельну камеру Nikon 5400. Цифрову камеру встановлювали приблизно на висоті 1,6 м над поверхнею льоду, забезпечуючи відхилений випадок знімання. Знімки були отримані з трьох відстаней (камера-об'єкт) і покривали три різні області поверхні. Зображення опрацьовували в ПП PhotoModeler Scanner.

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

На більшу увагу заслуговує робота [22]. У статті розглядається питання моніторингу прибережних змін за допомогою інтеграції методів геоматики для відтворення берегової лінії з високим просторовим розрізненням. Наголошено на врахуванні характеристик місцевості. Це є оптимальним підходом для виявлення змін форм рельєфу, особливо в прибережній зоні, де відбуваються динамічні процеси.

Запропоноване рішення ґрунтується на поєднанні даних з двох технологічних компонент – GPS-приймачів і цифрової малоформатної камери. Загальна технологічна схема, використана у роботі, представлена на рис. 1.

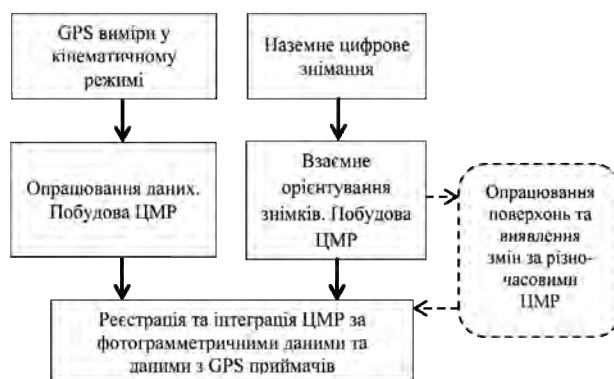


Рис. 1. Технологічна схема поєднання даних з GPS-приймачів та цифрових камер

Проаналізувавши запропоновану методику, потрібно відзначити, 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 у модульному режимі. Однак виникає необхідність оцінити результати, що задаються системою, тобто з'ясувати, чи

відповідають вони дійсності та чи похибки в даних і їх реєстрації не показують хибних змін.

Визначення швидкості зміщення льодовиків за допомогою наземних цифрових та аерокосмічних знімків і даних наземного лазерного сканування представлено у статті [21]. У праці аналізують спостереження на трьох льодовиках у західній Гренландії. Для досліджень використано цифрові камери з високою роздільною здатністю, які працювали періодами по 24–72 години з інтервалом знімання – 10–15 хвилин.

Зазначимо, що під час виконання спостережень виникали труднощі, пов'язані зі зміною кутів орієнтування камери, спричинені впливом вітру, нагріванням ніжок штатива та нестійкістю земної поверхні. Обробка послідовних отриманих зображень дала змогу побудувати ЦМР льодовика з високим розрізненням.

Також зміщення льодовиків визначали за знімками інтерферометричних РСА (2004 р.) 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.

Як альтернативу та доповнення використано наземний лазерний сканер Riegl LPM-321 (2007 р.). Перевагами методу НЛС є незалежність від сонячного світла і текстури поверхні, тобто є можливість використовувати прилад у довільні моменти часу. Недоліки сканування полягали у обмеженому розрізненні сканів, викликаному розбіжністю променя і низькою швидкістю сканування. Також значні незручності спричиняла необхідність електроенергії.

Застосовувати метод наземного лазерного сканування запропоновано у статті [29]. Представлена нова методика для визначення швидкості льодовиків у Гренландії з використанням лазерних сканерів. Різномасштабні 3D хмари точок отримано за допомогою лазерного сканера Riegl LPM-321, який пропонує максимальну дальність вимірювань 4 км. За цими даними будували ЦМР та визначали вектори швидкості, зіставляючи хмари точок з регулярною сіткою. Автори також пропонують рішення для визначення та усунення похибок у вимірах кутів, які виникають в отриманих даних.

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 [25] розглянуто методологію та результати застосування НЛС для отримання даних про поверхню льодовика Бельведері в Альпах. Традиційні вимірювання, які проводили з використанням GPS і “забурених” рейок, забезпечували тільки точкову оцінку явищ. Тому було заплановано кілька кампаній НЛС на різних ділянках поверхні льодовиків, щоб оцінити геодинамічні явища у процесі їх еволюції.

Для дослідження використано лазерний сканер Ortech IIRIS-3D™. Були виконані дві сесії сканування для кожного району спостережень з метою визначення змін об'єктів льодовика. Під час третьої сесії, на центральному тілі льодовика, виконували вимірювання для порівняння з даними вимірювань за

“забуреними” рейками, доповнених даними з GPS-приймачів, і отримуючи спільно зареєстровані дані.

Зазначимо, що у роботі фактично застосовували дві методики НЛС. Тобто під час спостережень використовували для деяких районів зв'язуючі марки, а для інших опорними точками слугували характерні природні об'єкти, наприклад, валуни.

Похибки на етапі реєстрації даних становили 1–2 см у разі 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 – понад 2 м з середньою швидкістю 0,05 м/добу. Крім того, за допомогою традиційних вимірювань визначали величину загального вертикального зсуву.

Аналізуючи цю працю, можна зробити висновок, що доведено застосовність запропонованих методик для виконання швидких та точних спостережень. На особливу увагу заслуговує методика використання природних об'єктів як опорних марок, оскільки це дає змогу виконувати НЛС у місцевості, недоступній для розташування марок. Проте варто зауважити, що такий підхід можна застосовувати тільки для поверхонь зі стабільними характерними природними об'єктами, які не змінюють розташування протягом періоду спостережень.

У працях [4, 5] запропонована технологія застосування стереофотограмметричного методу та наземного лазерного сканування для моніторингу острівних льодовиків Антарктичного узбережжя. Виконано дослідження поверхні виходів льодовиків, розташованих на островах Галіндез та Вінтер. Для польових вимірювань використано наземний лазерний сканер Faro Focus 3D. Оптиміальні параметри сканування встановлювали з експериментальних досліджень. Координати сканера та опорних марок визначено за допомогою двох двочастотних ГНСС приймачів. Похибка визначення координат точок не перевищувала 3 см.

Для опрацювання результатів вимірювань застосовували ПП Faro Scene, в результаті чого було створено просторові моделі виходів льодовиків. Необхідно підкреслити, що сканування виконувалося у складних погодних умовах – у дощ та при снігових зарядах. Ці опади були зафіксовані на сканах та видалені за використанням спеціальних фільтрів та у ручному режимі за допомогою програми Faro Scene. Під час апробації запропонованої технології виявлено, що різний за складом лід має відмінні відбивні властивості. Допустимі кути падіння лазерного променя на поверхню льодовика не повинні бути меншими за 45°. За менших кутів сканер практично не приймає відбитого сигналу. Відповідно з'являються невідскановані ділянки.

Паралельно до сканування проводилося НЦЗ з постійних точок базису. Під час знімання діапазон фокусної віддалі змінювався відповідно: 18, 35, 55 мм. Випадки знімання: нормальний та відхилені.

За результатами НЦЗ, виконаного у попередні роки (2002–2005 рр.), та досліджень у 2013 р. встановлено зміни поверхневого об'єму льодовиків та їх кінематичні характеристики [4].

Автори зазначають, що запропоновані технологічні схеми визначення поверхневих об'ємів льодовиків дають змогу оперативно і з необхідною точністю розв'язати поставлену задачу, без додаткових геодезичних вимірів. Проте варто зауважити, що під час лазерного сканування в деяких місцях на поверхні льодовика (тріщини, гроти) з'являлись невідскановані ділянки. Порівняльного аналізу точності обох методів в роботах також не представлено.

Підводячи підсумки, необхідно відзначити, що контактні методи дослідження 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 аерофотознімання та наземне цифрове знімання повністю задовольняють техніко-технологічні вимоги та виключають небезпечність під час виконання робіт. Але використання АФЗ в районі Антарктиди є технологічною проблемою, його собівартість дуже висока. Альтернативою аерофотозніманню є використання БПЛА, проте все ще не розроблено технологічні схеми їх застосування в полярних регіонах.

НЦЗ виключає негативні риси цих методів і дає можливість визначити параметри льодовиків, до яких передусім можна зарахувати форми та розміри, а також зміну об'ємів, складових їх мас льоду, а також використання знімальних матеріалів під час різноманітних гляціологічних робіт.

Застосування лазерного сканера, завдяки високій частоті отримання даних, надає повний опис поверхні льодовика в короткі терміни. Хмара точок відразу готова для обробки і дає змогу отримати геометричні характеристики об'єкта. Хоча використання НЛС для таких задач ще недостатньо вивчено, проте дає змогу підвищити точність отримання кількісних параметрів об'єктів дослідження, зокрема поверхонь льодовиків, і є доволі перспективним.

Застосування комплексної методики наземного лазерного сканування та цифрового знімання дасть змогу визначити кількісні параметри льодовиків без додаткових геодезичних вимірів, уникнути невідсканованих ділянок і отримати опорні точки для орієнтування цифрових зображень.

Проаналізувавши літературні джерела, пропонуємо загальну блок-схему методів та способів дослідження льодовиків (рис. 2).

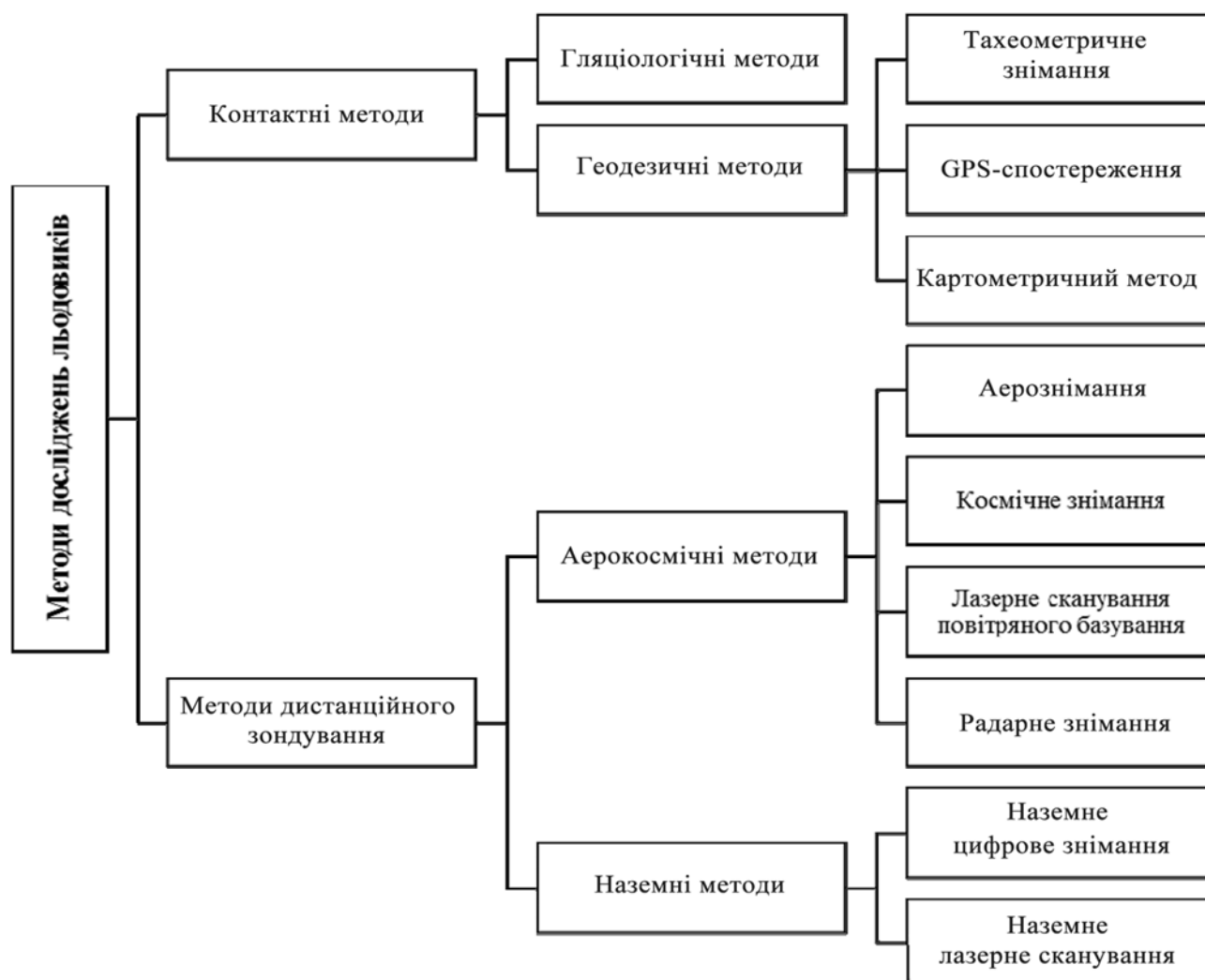


Рис. 2. Блок-схема методів та способів дослідження льодовиків

Висновки

1. Проаналізувавши літературні джерела, в яких розглянуто технологічні процеси досліджень динаміки змін льодовиків, потрібно зазначити, що вибрана тематика актуальна сьогодні, оскільки льодовики є показниками зміни клімату для всієї планети.

2. У наш час існує багато методів моніторингу льодовиків, які широко висвітлені в сучасних публікаціях.

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

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

5. Аерознімання задовольняє техніко-технологічні вимоги, проте застосування в полярних регіонах передбачає технологічні труднощі, а також високу собівартість робіт.

6. Застосування лазерного сканера, завдяки високій частоті отримання даних, надає повний опис поверхні льодовика в короткі терміни. Хоча використання НЛС для таких завдань ще недостатньо вивчено, проте дає змогу підвищити точність отримання кількісних параметрів об'єктів дослідження, зокрема поверхонь льодовиків, і є доволі перспективним.

7. Для моніторингу змін льодовикових поверхонь пропонується комбінування методів НЛС та НЦЗ.

8. Надалі планується розробити комплексну методику наземного лазерного сканування та цифрового знімання для дослідження кількісних параметрів льодовиків.

Література

1. Глотов В.М. Моніторинг острівних льодовиків Антарктичного узбережжя // Вісник геодезії та картографії. – К., 2006. – № 1. – С.31–34.
2. Моніторинг малих ледників як індикаторів змін клімату в районі Антарктичного півострова / В.М. Глотов, С.Б. Коваленко, Г.П. Милиневський, Е.Ф. Накалов, Ю.Ф. Фулітка // Український антарктичний журнал. – 2003. – № 1. – С.93–99.
3. Кількісні параметри острівних льодовиків за результатами цифрового стереофотограмметричного знімання / В.М. Глотов, С.Б. Ковальонко, В.В. Чижевський // Укр. антаркт. журн. – 2004. – № 2. – С.58–65.
4. Аналіз результатів моніторингу острівних льодовиків антарктичного узбережжя цифровим стереофотограмметричним методом / К. Третяк, В. Глотов, Ю. Голубінка // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – Львів. – 2013. – С.131–136.
5. Результати визначення поверхневих об'ємів острівних льодовиків антарктичного узбережжя комплексним методом / К. Третяк, В. Глотов, Ю. Голубінка, Х. Марусаж // зб. наук. пр. XVIII – Міжнар. наук.-техн. симпозиуму "Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GNSS і GIS-технології", Алушта, 10–15 вересня 2013 р. – С.9–16.
6. Dyurgerov M. V. Reanalysis of Glacier Changes: From the IGY to the IPY, 1960–2008 // Матеріали гляціологічних досліджень. – М., 2010. – Вип. 108. – С.116.
7. Grosswald M.G. Ice sheets in the Russian North and North-East during the last Great Chill // Матеріали гляціологічних досліджень. – М., 2009. – Вип. 106. – С.152.
8. Glacier surface monitoring by maximizing mutual information / E. Erten, C. Rossib, I. Hajnsek // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australia. – 2012. – P.41–44.
9. Monitoring temperate glacier with high resolution automated digital cameras – application to the argentière glacier / R. Fallourd, F. Vernier, J.-M. Friedt, G. Martinc, E. Trouvé, L. Moreau, J.-M. Nicolas // IAPRS, Vol. XXXVIII, Saint-Mandé, France. – 2010. – P.19–23.
10. Determination of glacier surface area using spaceborne SAR imagery / L. Fang, O. Maksymiuk, M. Schmitt, U. Stilla // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W1, ISPRS Hannover, Germany. – 2013. – P.105–110.
11. A comparison of three methods of mass-balance determination in the Tuyuku glacier region, Tien Shan, Central Asia / W. Hagg, L. Braun, V. Uvarov, K. Makarevich // Journal of Glaciology, Volume 50, Number 171, December. – 2004. – P.505–510.
12. Karpilo R. D. Jr. Glacier monitoring techniques // Geological Monitoring: Boulder, Colorado, Geological Society of America. – 2009. – P. 141–162, doi: 10.1130/2009
13. Kaser G., Fountain A., Jansson P. A manual for monitoring the mass balance of mountain glaciers: International Hydrological Programme. – No. 59 UNESCO, Paris. – 2003. – P.137.
14. Kaufmann V. The evolution of rock glacier monitoring using terrestrial photogrammetry: the example of Äußeres Hochebenkar rock glacier // Austrian Journal of Earth Sciences. Volume 105/2. – Vienna, 2012. – P.63–77.
15. 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 Science, Beijing, China, 2008. – P.813–818.
16. Estimation of glaciers and snow coverage in western part of Mongolia using Modis snow products / B. Khosbayar, R. Tsolmona, Y. Uranchimegb // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B7. Beijing, 2008. – P.1025–1026.
17. Knoll C., Kerschner H. A glacier inventory for South Tyrol, Italy, based on airborne laser scanner data, Annals of Glaciology, 50(53). – 2009. – P.46–52.
18. Application of surface matching for improved measurements of historic glacier volume change in the Antarctic peninsula / M. Kunz, J.P. Mills, P.E. Miller, M.A. Kinga, A.J. Fox, S. Marsh // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australia, 2012. – P.579–584.
19. Lufs F.F. Monitoring glacier variations in the southern Patagonia ice field utilizing images Landsat 7 ETM+ \ International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australia, 2012. – P.567–571.

20. Determination of spatio-temporal velocity fields on glaciers in West-Greenland by terrestrial image sequence analysis / H. Maas, E. Schwalbe, R. Dietrich, M. Bässlér, H. Ewert // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XXXVII congress ISPRS, Beijing, 2008. – P.1419–1424.
21. A geomatics data integration technique for coastal change monitoring / J.P. Mills, S.J. Buckley, H.L. Mitchell, P.J. Clarke, S.J. Edwards // *Earth Surface Processes and Landforms Earth Surf. Process. Landforms* 30, 2005. – P. 651–664. DOI: 10.1002/esp.1165
22. Change detection of mountain glacier surface using aerial and satellite imagery: a case study in Iran, Alamchal glacier / M.S. Moussavi, M.J. Valadan Zoej, M.R. Sahebi, Y. Rezaei // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information*. XXI ISPRS Congress, Beijing, 2008. – P.1013–1018.
23. Pellikka P., Rees W.G. *Remote Sensing of Glaciers*, London: CRC Press, 2010. – P.350.
24. Rodriguez A.M. *Laser Scanner Technology* Edited by J., Published by InTech, 2012. – 258 p.
25. Rolstad C., Haug T., and Denby B. 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), 2009. – P.666–680.
26. Studying glacial melt processes using sub-centimeter DEM extraction and digital close-range photogrammetry / E. Sanz-Ablanedo, J.H. Chandler, T.D. Irvine-Fynn // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australia 2012. – P.435–440.
27. Schoenung S.M., Albertson R.T. *Remote Sensing in the Arctic Using Autonomous Sensors Developed under NASA's Airborne Science Program for the International Polar Year* // 34th International Symposium on Remote Sensing of Environment. – 2011. – 4 p.
28. Glacier velocity determination from multi temporal terrestrial long range laser scanner point clouds / E. Schwalbe, H-G. Maas, R. Dietrich, H. Ewert // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing, 2008. – P.457–463.
29. Solbo S., Storvold R. Mapping svalbard glaciers with the Cryowing UAS // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Rostock, Germany, Volume XL-1/W2, 2013. – P.373–378.
30. Storvold R. *Scientific UAS Missions in the Polar Regions* // *UAS Yearbook "UAS: The Global Perspective"*, 2009. – P.132–133.
31. Terrain correction of polarimetric sar data and its application in mapping mountain glacier facies with radarsat-2 SAR / B. Tian, L. Zhen, Zh. Yanan // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, ISPRS Hannover, Germany, 2011. – P.319–324.
32. Monitoring rapidly evolving landscape features using groundbased time-lapse photography: a case study for a proglacial icing / K. Whitehead, B. Moorman, P. Wains-
tein, A. Habib // *The Canadian Geomatics Conference and Symposium of Commission I, ISPRS*, 2010. – P.6.
33. Kilimanjaro ice cliff monitoring with close range photogrammetry / M. Winkler, W.T. Pfeffer, K. Hanke // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXIX-B5, XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australia 2012. – P.441–446.
34. Monitoring of glacial change in the head of the Yangtze river from 1997 to 2007 using InSar technique / H. Wu, Y. Zhang, J. Zhang, Zh. Lu, W. Zhong // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXII ISPRS Congress, Melbourne, Australia, 2012. – P.411–415.
35. Monitoring of glacier volume variation from multi-source data over Geladandong area / Y. Zhang, H. Wua, S. Jin, H. Wang // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XL-7/W1, 3rd ISPRS IWIDF, Antu, Jilin Province, PR China, 2013. – P.199–203.
36. Remote sensing application in Antarctic inland areas / Ch. Zhou, E. Dongchena, Z. Wang, J. Sun // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Beijing, 2008. – P.819–824.
37. Combining photogrammetry and laser scanning for DEM generation in steep high-mountain areas / M. Züblina, L. Fischerb, H. Eisenbeissa // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XXXVII. Beijing, 2008. – P.37–44.

**Аналіз сучасних методів дослідження
кількісних параметрів льодовиків
Х. Марусаж**

Подано аналіз сучасних технологій досліджень льодовиків. Наголошено на зміні кількісних параметрів льодовиків, що пов'язано зі зміною клімату на Землі. Зроблено відповідні висновки щодо застосування різних методів дослідження змін льодовиків.

**Анализ современных методов исследования
количественных параметров ледников
Х. Марусаж**

Представлен анализ современных технологий исследований ледников. Отмечается изменение количественных параметров ледников, что связано с изменением климата на Земле. Сделано соответствующие выводы по применению существующих методов исследования изменений ледников.

**Analysis of modern methods of research
quantitative parameters of glaciers
Kh. Marusazh**

In article are presents an analysis of modern technology investigation of glaciers surface. Accented on changing the quantitative parameters of glaciers that is connected with climate change on Earth. Corresponding conclusions about application of the existing methods to investigate the changes of glaciers.