

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ  
ТАРАСА ШЕВЧЕНКА  
ГЕОГРАФІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ  
Кафедра землезнавства та геоморфології

На правах рукопису  
УДК: 551.4

Кваліфікаційна робота магістра  
на тему:

**Особливості виконання високоточної зйомки**

**рельєфу та оновлення картографічних даних за допомогою БПЛА**

Галузь знань: 10 – Природничі науки

Спеціальність: 103 – Науки про Землю

Освітня програма: «Геоморфологія та палеогеографія»

Виконав:

студент 2-го курсу  
магістратури

кафедри землезнавства та  
геоморфології

Федулов Лев Костянтинович

Науковий керівник

доктор географічних наук, професор

Комлев Олександр Олександрович

Київ-2021

## ВСТУП

Розділ 1. Створення нових та оновлення застарілих картографічних даних.

1.1 Приклад використання БПЛА

1.2 Метод оновлення та геометричної корекції ретроспективних карт за допомогою БПЛА

1.3 Методи оновлення ретроспективних картографічних даних

1.4 Геометрична корекція ретроспективних карт за допомогою БПЛА

Розділ 2. Сфери використання БПЛА

2.1 Можливості БПЛА у гідрологічних дослідженнях

2.2 Методика вивчення екзогенних геологічних процесів за допомогою БПЛА

2.3 Високоточне ландшафтне картографування заболочених геосистем за допомогою БПЛА

2.4 Дослідження четвертинних відкладів за допомогою БПЛА

2.5 Використання БПЛА для крупномасштабного картографування ґрунового покриву

2.6 Виконання зйомки абразивного рельєфу за допомогою БПЛА

Розділ 3. Методи цифрової обробки даних, отриманих за допомогою БПЛА

3.1 Комбінування методів дистанційного зондування і зйомкою за допомогою безпілотних літальних апаратів

3.2 Методи проведення цифрової зйомки місцевості за допомогою БПЛА

3.3 Екстраполяція даних, отриманих за допомогою БПЛА

Розділ 4. Моніторинг трансформації рельєфу та гляціальних процесів в умовах високогір'я за допомогою БПЛА.

4.1 Вивчення гляціальних відкладів за допомогою БПЛА та технологією SfM

4.2 Методи вивчення гляціальних відкладів

4.3 Моніторинг процесу швидкого танення Альпійських льодовиків за допомогою безпілотних літальних апаратів.

4.3.1 Територія дослідження

4.3.2 Наземні контрольні точки

4.3.3 Формування ортофотопланів та цифрових моделей рельєфу

4.3.4 Точність ЦМР та ортофотопланів

4.3.5 Різниця між двома ЦМР

4.3.6 Візуальні та автоматичні вимірювання переміщень на ортофотоплані

4.3.7 Підсумки дослідження

4.4 Вивчення динаміки та картографування соліфлюкційних процесів на основі зйоми БПЛА

4.4.1 Досліджувана область

4.4.2 Методи дослідження

4.4.3 Швидкість та закономірності руху соліфлюкції

4.4.4 Застосовність фотограмметрії на основі БПЛА для відображення руху соліфлюкції

**ВИСНОВКИ**

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Дані аерофотозйомки – найдоступніший метод отримання необхідних даних для створення нових, або оновлення вже існуючих карт і планів місцевості. Наразі будь-яке вивчення місцевості доповнюється аерофотозйомкою, що виконується за допомогою безпілотних літальних апаратів. Дані, отримані за допомогою безпілотних літальних апаратів виступають вигіднішою альтернативою класичним методам зйомки місцевості, забезпечуючи вищу якість знімку й свободу у виборі ракурсів зйомки об'єкта, що дає можливість створювати картографічний матеріал вищої якості.

**Об'єкт дослідження.** Безпілотні літальні апарати, як інструмент отримання картографічних даних.

**Предмет дослідження.** Методи використання безпілотних літальних апаратів для створення нових, та оновлення застарілих картографічних даних.

**Мета дослідження.** Розкрити потенціал безпілотних літальних апаратів для вивчення характеристик рельєфу, як морфологія, морфометрія й сучасна динаміка, що виступають ключовими даними при вивченні характеристик природних систем.

Довести переваги електронної обробки даних й технології дитанційного сканування місцевості, що значно полегшують процес зйомки досліджуваної поверхні. Розглянути перспективи використання безпілотних літальних апаратів при створенні та оновленні картографічних даних, сучасні методи вираження картографічних даних у цифровому форматі при активній антропогенній зміні навколишнього середовища.

**Наукова новизна** визначається тим, що у дослідженні проаналізовані основні напрямки використання безпілотних літальних апаратів й приведено

приклади використання у багатьох сферах дослідження, що підтверджує їх незамінність. Комплексна характеристика новітньої літератури та її аналіз дозволяють стверджувати, що досліджувана тема є актуальною і знаходить на стадії стрімкого розвитку.

## **Розділ 1. Створення нових та оновлення застарілих картографічних даних.**

### **1.1 Приклад використання БПЛА**

При дослідженні ділянок, на яких антропогенна й природна ситуація змінюється з великою швидкістю: розбудова міст, зміна берегової лінії, засніження сільськогосподарських угідь, моніторинг ділянок з підвищеним ризиком сходження зсувів й лавин, зміна стану зрошувальних систем, однією з найголовніших можливостей БПЛА є наявність прив'язки GPS-координат і висоти зйомки до знімку місцевості. Подальша обробка даних проходить у геоінформаційних системах (Agisoft...), за допомогою яких можна створювати як ортофотоплани, так і 3D моделі місцевості. Подальша обробка може проходити у будь-яких ГІС редакторах. Можливості, що надає зйомка місцевості за допомогою БПЛА обмежуються лише технічними характеристиками обладнання, навичками і цілями науковця. Та, не зважаючи на широкий спектр задач, що може виконувати БПЛА, найсильнішою стороною зйомки усе-таки виступає оперативність та мінімальні фінансові витрати на використання.

Однією з найбільших проблем виступає рослинний покрив місцевості й тіні, що при первинній обробці розцінюється програмним забезпеченням як елементи рельєфу. Вирішити дану проблему можна за допомогою додаткового програмного забезпечення, яке через високу ціну мало хто може собі дозволити.<sup>1</sup>

---

1 Krylenko, V.V. (2013). The use of GNIC LEICA GEOSYSTEMS equipment in scientific research. *Geoprofi. Moscow*.  
2 Коновалова Т.И. Геосистемное картографирование. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2010

## 1.2 Метод оновлення та геометричної корекції ретроспективних карт за допомогою БПЛА

На даний момент у багатьох державних та науково дослідних установах, що використовують картографічні дані за тією чи іншою потребою, використовуються картографічні дані різних років видання, що у більшості своїй вже не відповідають сучасним вимогам і потребують оновлення.

Ретроспективні карти – картографічні дані, що втратили свою актуальність через зміну вигляду відтворюваної ділянки земної поверхні. Не зважаючи на це, картографічні дані мають велике господарське та науково-дослідне значення, для дослідження стану та динаміки розвитку господарської діяльності, соціально-економічної сфери, природних процесів... Саме через це має бути розроблений оптимальний метод корекції та оновлення важливих картографічних даних, що забезпечить гідну якість та оперативність надання картографічного матеріалу.

Використання геоінформаційних систем та БПЛА дозволить оперативно вирішувати поставлені задачі завдяки високому рівню автоматизації, підвищити точність та строки надання послуг, а також значно полегшить обробку великих масивів даних. <sup>2</sup>

---

1 Коновалова Т.И. Геосистемное картографирование. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2010

2 Пахахинова З.З., Батоцыренов Э.А., Бешенцев А.Н. Картографическая регистрация базовых пространственных объектов для мониторинга природопользования

3 Батоцыренов Э.А., Цыдыпов Б.З., Алымбаева Ж.Б., Содномов Б.В., Гуржапов Б.О., Андреев С.Г., Аюржанаев А.А., Жарникова М.А., Саяпина Д.О., Серкина Д.А., Гармаев Е.Ж. Опыт использования беспилотных летательных аппаратов в геоэкологических исследованиях // Актуальные вопросы в области землеустройства, кадастров и природообустройства: проблемы и перспективы развития: материалы международной научно-практической конференции, посвященной 20-летию кафедры землеустройства (13 мая 2016 г.).

### **1.3 Методи оновлення ретроспективних картографічних даних**

Оцінка точності ретроспективних карт основана на повторному вимірі положення реперних точок сучасними методами. Порівняльний аналіз дозволяє оновлювати картографічні дані, якщо середньоквадратичні помилки не перевищують наступні значення: населені пункти- до 200м; дорожня мережа- до 200м; контури об'єктів- до 200м; річкова мережа- до 100м. Надані розміри похибки є середніми значеннями. Помітна тенденція росту похибок по мірі віддалення від річкової мережі або головної дороги, що слугували головними орієнтирами при проведенні топографічної зйомки. Такі показники похибок підтверджують низьку, по сучасним міркам, точність картографічних даних, що наразі продовжують використовуватися державними установами.

Для зйомки сучасних меж об'єктів можна використовувати можливості БПЛА з подальшою обробкою отриманого матеріалу геоінформаційними системами. При оптимальній висоті зйомки в 500м, таким способом можна досягти роздільної здатності у 1 піксель на 20 см<sup>2</sup>. Подальша обробка знімків проходить у автоматичному режимі і не потребує попереднього, що значно полегшує і пришвидшує роботу фахівця. Оброблена інформація надається у форматі Geo Tiff, проекція World Geodetic System 1984 й експортується у середовище ГІС для подальшого редагування.

### **1.4 Геометрична корекція ретроспективних карт за допомогою БПЛА**

Геометрична корекція карти- це методика, що являє собою сукупність операцій виправлення векторних шарів за допомогою геометричного переміщення реперних точок об'єктів. Реперними точками називають однаково розташовані точки, положення яких можна чітко визначити на ретроспективній карті та за допомогою БПЛА. Реперними точками можуть

виступати пересічення лінійних об'єктів, точкові об'єкти, чітко визначені на обох, порівнюваних між собою, картографічних основах.

Для забезпечення високоточного моніторингу зміни будь-яких картографічних даних, створюється єдина картографічна основа. Така основа складається з сукупності базових просторових об'єктів, що представляють собою найбільш стабільні точки: місця перетину доріг, гідрографія, населені пункти. Тобто об'єкти, що найменш схильні до зміни положення з плином часу. Кожен проект потребує власного масиву базових просторових об'єктів, якими слугують постійні межі населених пунктів, гідрографічна мережа, точки перетину доріг. Після створення мережі базових просторових об'єктів, масиви даних обробляються у ГІС редакторах для переходу від ретроспективної карти до цифрової інтерактивної.<sup>3</sup>

---

1 Батоцыренов Э.А., Цыдыпов Б.З., Алымбаева Ж.Б., Содномов Б.В., Гуржапов Б.О., Андреев С.Г., Аюржанаев А.А., Жарникова М.А., Саяпина Д.О., Серкина Д.А., Гармаев Е.Ж. Опыт использования беспилотных летательных аппаратов в геоэкологических исследованиях // Актуальные вопросы в области землеустройства, кадастров и природообустройства: проблемы и перспективы развития: материалы международной научно-практической конференции, посвященной 20-летию кафедры землеустройства (13 мая 2016 г.).

2 ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ Материалы Всероссийской научно-практической конференции (Иркутск, 22–23 мая 2018 г.). – Иркутск: Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2018.

## **Розділ 2. Сфери використання БПЛА**

### **2.1 Можливості БПЛА у гідрологічних дослідженнях**

У гідрологічних дослідженнях використання дистанційних методів дослідження значно полегшує виконання ряду завдань, необхідних досліднику. З плином часу інструменти отримання даних притерпіли значних змін, від аерофотознімків до космічної супутникової інформації, а останнім часом усе більших обертів набирає використання безпілотних літальних апаратів. Основними перевагами БПЛА у гідрологічних дослідженнях є більша деталізація знімків поверхні, також вагомою перевагою є можливість проведення рекогносцировки і відбору зразків у важкодоступних місцях. Також, при обладнанні дрону додатковими комплектами навісного спорядження, з'являється можливість розширити потенціал для збору інформації, наприклад фіксувати ряд фізико-хімічних показників й динамічні показники водного об'єкту.

Головними напрямками використання БПЛА у гідрологічних дослідженнях є гідрографія та гідрометрія, руслові та гідро-морфологічні дослідження, небезпечні гідро-екологічні дослідження, гляціологічні процеси, водно-екологічні проблеми.

Для вивчення гідрологічних особливостей місцевості науковець повинен мати повну картографічну і візуальну уяву про рельєф території, форму річкової долини, її межі, а також меж водозбору. При вивченні озер необхідними будуть морфологічні показники котловини, її тип, а також степінь заростання водного об'єкту.

Використання дронів значно полегшить проведення гідрометричних робіт: підрахунок густоти річкової мережі, коефіцієнту звивистості, температури поверхні водного об'єкту, довжини берегової лінії. Також ведеться розробка методів виміру рівня води.

Вивчення будь-якого водного об'єкту передбачає його моніторинг й вимагає регулярних моніторингових зйомок, що необхідні для вивчення динаміки трансформації заплавної комплексу, а також їх типізації. Зручним варіантом для проведення цих робіт є БПЛА. Комбінування декількох матеріалів, отриманих різними методами, наприклад топографічна карта+космічні знімки+матеріали отримані за допомогою БПЛА, дають можливість отримати кращу деталізацію поверхні, полегшують ідентифікацію та визначення форм руслових та заплавної утворень, ідентифікацію руслових процесів та характер розподілу наносів.

Використання безпілотних літальних апаратів доцільне при ревізії та модернізації берегів водосховищ, трансформації річкового русла, пошуку місць пришвидшеного руйнування берегу, пошуку місць проведення робіт по відновленню берега, пошуку перспективних місць встановлення гідротехнічних споруд.

Важливою сферою використання БПЛА є моніторинг небезпечних гідрологічних явищ. Попереднє визначення водотоків, що можуть бути підвержені повеням і паводкам, визначення меж населених пунктів і сільськогосподарських об'єктів, що потрапляють в зону ризику, що проводиться за допомогою аналізу космічних знімків і оперативного збору даних, отриманих за допомогою БПЛА. Також безпілотні літальні апарати можуть використовуватися для дослідження місць формування селевих паводків і попередження населення про можливість сходження селів.

Вивчення різного роду гляціологічних явищ є одним з перспективних напрямків розвитку БПЛА. Вивчення меж поширення, розмірів, областей живлення й стоку, а також вивчення льодовиків, як потенційних джерел прісної води, моніторинг об'ємів формування наледі у річкових руслах і долинах рік, а також підрахунок сконцентрованих у них об'ємів води є перспективним напрямком для використання безпілотних літальних апаратів.

Під час вирішення екстримально-екологічних ситуацій доцільно використовувати безпілотні літальні апарати для визначення джерел забруднення, відбору проб води та визначення характеру забруднення водного об'єкту.

Також доцільним є використання БПЛА є охорона навколишнього середовища, що включає у себе як моніторинг, так і контроль підприємств, що викидають небезпечні компоненти, які можуть нашкодити навколишньому середовищу. Першочерговими об'єктами контролю виступають несанкціоновані викиди в акваторію забруднюючих речовин, забруднення водних об'єктів при аварійних ситуаціях на трубопроводах, моніторинг заповідних водних і водно-болотних об'єктів, контроль водоохоронних заходів.<sup>4</sup>

---

1 *Alfredsen Knut, Haas Christian, Tuhtan Jeffrey A., Zinke1 Peggy*. Brief / Communication: Mapping river ice using drones and structure from motion. The Cryosphere journal. Discussion started: 9 October 2017

2 *Банщикова А.А., Банщикова Л.С.* Результаты оценки параметров затора льда с помощью беспилотного летательного аппарата на участке р. Мста у д. Малый Порог. Труды V Всероссийской конференции «Ледовые и термические процессы на водных объектах России». – М: Изд-во РГАУ-МСХА, 2016

*Писарев А.В.* Возможности применения БПЛА для построения высокоточной цифровой модели рельефа местности малых рек // Проблемы теории и практики современной науки / Материалы V Меж-дународной научно-практической конференции. Издательство «Перо». – 2016

## **2.2 Методика вивчення екзогенних геологічних процесів за допомогою БПЛА**

На протязі 20 століття основу вивчення екзогенних геологічних процесів складала вивчення аеро-космічних знімків та наземні дослідження. Найбільшу цінність представляли аерознімки різних років видавництва, що отримувалися шляхом фотографування місцевості з літака або вертольоту. Така зйомка місцевості мала ряд суттєвих переваг, як робота в місцях, недоступних для наземної зйомки, великий відрізок часу знаходження у повітрі й значні відстані, що покривалися екіпажем за один виліт, що давало змогу зібрати великі масиви даних за короткий відрізок часу. Також аерозйомка мала ряд суттєвих недоліків, як складність отримання якісних знімків через велику швидкість польоту (200км. год.), нестала висота польоту, що могла змінюватись в цілях безпеки і висока ціна експлуатації.

Швидкий розвиток електроніки і техніки у 21 ст. сприяв розвитку БПЛА, спочатку у військових, а надалі й в усіх інших галузях. Ефективний час роботи стандартного квадрокоптеру складає близько 10 хв. Використання квадрокоптерів має ряд переваг, що робить його ефективним інструментом науковця. Під час польоту БПЛА можна виконувати як планову так і перспективну зйомку, проводити зйомку на будь-якій висоті, що дозволяє оператору балансувати між площею досліджуваної території на одному знімку й роздільною якістю отриманого зображення, проводити зйомку у будь яку пору року (за умови рамок робочих температур спорядження), а також відсутня необхідність у спеціальних злітних майданчиках й кваліфікованих операторах.

При зйомці поверхні за допомогою БПЛА деталізація отриманих даних незрівнянно вища, ніж у альтернативних видів зйомки, що дозволяє з високою точністю розділяти різні види ландшафтів, типи берегів... Висока деталізація знімків при вивченні ерозійних процесів дозволяє науковцю ясно бачити картину повністю, без необхідності повторного виїзду на місцевість для

польових досліджень. Найбільш інформативною є зйомка озерно-болотно-еолових комплексів, за допомогою якої можна з великою точністю ідентифікувати протікаючі природні процеси. <sup>5</sup>

---

1 Гео-Сибирь. – 2015. – С. 32–41. *Батоцыренов Э.А., Цыдыпов Б.З., Алымбаева Ж.Б., Содномов Б.В., Гуржапов Б.О., Андреев С.Г., Аюржанаев А.А., Жарникова М.А., Саяпина Д.О., Серкина Д.А., Гармаев Е.Ж.* Опыт использования беспилотных летательных аппаратов в геоэкологических исследованиях // Актуальные вопросы в области землеустройства, кадастров и природообустройства: проблемы и перспективы развития: материалы меж-дународной научно-практической конференции, посвященной 20-летию кафедры землеустройства (13 мая 2016 г.)

2 *Писарев А.В.* Возможности применения БПЛА для построения высокоточной цифровой модели рельефа местности малых рек // Проблемы теории и практики современной науки / Материалы V Меж-дународной научно-практической конференции. Издательство «Перо». – 2016

## **2.3 Високоточне ландшафтне картографування заболочених геосистем за допомогою БПЛА**

Для ефективного проведення як господарської, так і науково-дослідної діяльності необхідно мати точне уявлення про характеристики місцевості. Комплексне уявлення про досліджувану місцевість може дати використання ландшафтного підходу. Однією з основних причин використання комплексного ландшафтного підходу виступає моніторинг природоохоронних комплексів.

Окремою сферою використання безпілотних літальних апаратів є картографування важкодоступних і важкопрохідних заболочених місцевостей. Для використання супутникових знімків потрібно мати велику кількість еталонних наземних знімків, що потребує крупномасштабних експедиційних робіт у важких для роботи умовах. Наступною проблемою є низька роздільна здатність супутникових знімків, що відповідають картографічним даним масштабу від 1:500 000 до 1:200 000, або середній роздільній здатності у 32-33 метри на піксель. Для проведення якісних науково-дослідних робіт необхідні фотоматеріали значно вищої якості, що відповідають масштабу від 1:100 000 до 1:25 000 і розповсюджуються виключно приватними установами.

Альтернативою високоточним космічним знімкам виступає зйомка місцевості за допомогою безпілотних літальних апаратів, метод, що останнім часом набуває усе більшої популярності в географічних науках. За допомогою додаткового обладнання можна отримувати знімки місцевості з високоточною висотною прив'язкою, а також з прив'язкою до системи координат та орієнтацією знімку в просторі. Залежно від класу обладнання, можна отримувати роздільну здатність знімків 0.3-0.1 м на піксель і вище, на відміну від космічних знімків, які мають обмеження у 0.7 м.

Прикладом практичного використання може слугувати зйомка острівних територій з різними типами ландшафтів, як заболочені гирла річок,

пригирлові заболочені ділянки з перехідними типами рослинності, перехідні схилові болота з перехідними ділянками до боліт верхового типу.

При зйомці об'єктів невеликого масштабу можна знизити висоту польоту з 400-500 метрів до 150-200 і отримати роздільну здатність 7.0-6.0 см, що забезпечить значно вищу якість знімків з можливістю ідентифікувати представників флори на ортофотоплані.

Штатна апаратура квадрокоптеру забезпечує прив'язку знімків до місцевості з точністю від 3 до 4 метрів, що за картографічними мірками відповідає картам масштабу 1:10 000. Залежно від висоти зйомки ширина полоси зйомки буде варіюватися від 300 до 450м, а довжина ділянки зйомки за один виліт від 3 до 5 км з перекриттям знімків на ортофотоплані 80%.

Первинна обробка отриманого матеріалу проходить у спеціалізованих програмах Pix4Dcapture, DroneDeploy і т.д., що прив'язують знімки до місцевості, проводять корекцію кольорів, створюють ортофотоплан без необхідності задання додаткових контрольних точок прив'язки знімку у труднодоступних місцях. Вагомою перевагою згаданих програм є можливість створювати маршрути польоту з утриманням потрібної висоти.

Повторна обробка матеріалу проводиться оператором у ручному режимі, що дозволяє перевірити дані на наявність похибок і точності обрахунків, а також повторна корекція кольорової гамми сусідніх знімків.

Використання БПЛА у комплексі з програмним забезпеченням для обробки даних дозволяє не лише створювати ортофотоплани, а й цифрові 3D моделі рельєфу, детально визначати показника флори, проводити аналіз мікрорельєфу, визначати взаєморозташування геосистем і вносити інформацію у звіти. Тож використання запропонованих методів не тільки

знизить витрати на спорядження експедицій у важкодоступні регіони, а ще й підвищить точність і загальну якість досліджень.<sup>6</sup>

---

1 *Bandini F., Bauer-Gottwein, P., & Garcia, M.* Hydraulics and drones: observations of water level, bathymetry and water surface velocity from Unmanned Aerial Vehicles. Kgs. Lyngby: Department of Environmental Engineering, Technical University of Denmark (DTU). 2017

2 *Filippo Bandini, Jose Antonio Reyna-Gutierrez, Peter Bauer-Gottwein.* Measuring water level in rivers and lakes from lightweight Unmanned Aerial Vehicles / *Journal of hydrology* Volume 548, May 2017

## 2.4 Дослідження четвертинних відкладів за допомогою БПЛА

Класичним підходом дослідження четвертинних відкладів є камеральне дослідження звітів попередніх років інженерно-геологічних та літолого-геологічних свердловин, штучних та природних відслонень. Стандартною процедурою є відбір монолітів й зразків порушеної структури для проведення ряду лабораторних досліджень. Класифікація четвертинних відкладів проходить у два етапи: попередня польова діагностика і лабораторна класифікація ґрунтів. Класифікація четвертинних відкладів проходить за жорсткими державних стандартів, відповідно до їх складу, фізико-механічних властивостей.

Система четвертинних відкладів поділена на геологічно-генетичні комплекси, що об'єднують четвертинні відклади на групи залежно від їх віку, генезису і складу. Існують наступні геологічно-генетичні групи: LS (лесовий комплекс), GLN (глинистий комплекс), PS (піщаний комплекс), CR (грубоуламковий комплекс). Основним методом вираження інформації є геологічна карта. Одразу варто відмітити, що неможливо виконати повний цикл досліджень, використовуючи виключно можливості БПЛА. Необхідно проводити попередній збір інформації по досліджуваній ділянці й виділяти геологічно-генетичні комплекси ділянок, що підлягатимуть зйомці в майбутньому. Наступним кроком до зйомки місцевості виступає наземне дослідження місцевості, відбір зразків з відслонень та їх лабораторний аналіз.

Зробити акцент варто на тому, що використання БПЛА може бути доцільним лиш при дослідженні природних або ж техногенних відслонень, з характерними наслідками активних екзогенних процесів. Яскравими прикладами будуть системи ярів, незахищений лесовий покрив систем терас, дюни, борозни або вимоїни.

Тобто, використовуючи БПЛА для вивчення четвертинних відкладів не може слугувати альтернативою класичному бурінню, проте може значно полегшити дослідження екзогенних геологічних процесів, що протікають на досліджуваній ділянці.

## **2.5 Використання БПЛА для крупномасштабного картографування ґрунтового покриву**

Частка сусідь, охоплена сільськогосподарськими угіддями станом на 2016 рік складає 34%, й приблизно половину земель, обжитих людиною.

Населення планети невпинно зростає, що змушує підвищувати об'єми сільськогосподарської продукції. Збільшити кількість продукції можна за допомогою нових підходів та методів менеджменту та моніторингу земель. За допомогою безпілотних літальних апаратів можна не лише проводити моніторинг сільськогосподарських угідь, а й безпосередньо використовувати їх для вирішення деяких з них. Одним таких методів є опилання пошкоджених шкідлими ділків. Оперативність та фінансові втрати значно менші від класичних методів обробки, адже один БПЛА може провести зондування, визначити й зберегти координати місць, уражених шкідниками або хворобою й після короткотривалої обробки даних провести опилання необхідними препаратами.

Моніторинг якості ґрунтового покриву має велике значення для планування землекористування, кадастрових потреб, а також моніторингу екологічної ситуації. Початковим етапом дослідження будуть польові та камеральні роботи. Необхідність використання БПЛА настає при потребі інтерполяції даних на картографічну основу.

Стрімкий розвиток наук про землю призвів до того, що у наш час неможливо уявити картографування місцевості у будь-якій галузі, включаючи ґрунтознавство, без використання ГІС-програм. Використання безпілотних

літальних апаратів дозволяє не тільки отримувати загальну інформацію що до стану ґрунтового покриву, а й забезпечити дослідника такими показниками як характер рослинного покриву, характер мікрорельєфу, характер кольорової гама ґрунтового покриву, що дозволяє оцінити характер засоленості ґрунту, вміст карбонатів, вміст гумусу та зволоженість. Також, при проведенні рекогнозцирувальних робіт, використання БПЛА є найбільш доцільним, адже перспектива, що стає доступною при погляді з висоти дозволяє об'єктивно оцінити масштаб робіт, та попередньо обрати місця для закладання ґрунтових розрізів.

Варто зауважити, що знімки, отримані за допомогою БПЛА, не дають «прямих» даних про стан ґрунтового покриву, навіть сам ґрунт часто є недоступним для зйомки через наявність рослинного покриву. Еталонну зйомку поверхні ґрунту можна провести тільки після пахоті. Використання БПЛА доцільно скоріше для моніторингу самих ґрунтоутворюючих процесів, як геологічної будови місцевості, рельєфу, сільськогосподарської діяльності, рослинності...

Задачею оператора БПЛА є дослідження природних закономірностей розподілу ґрунтового покриву і взаємозв'язки між ними у кожному геолого-геоморфологічному районі. Найефективнішим методом виступає пошук та індикація площинно-ключових ділянок і створення карт масштабом 1:20 000-1:50 000.

Дослідження ґрунтового покриву безпілотними літальними апаратами доцільно проводити на територіях вільних від лісу, а також за межами населених пунктів, на територіях, де знімки підлягають дешифруванню. Доцільно використання БПЛА на територіях з активним проявом екзогенних геологічних процесів, наприклад піщаний рельєф, суфозійні воронки, ділянки з активним проявом мерзлотних процесів. Тож використання БПЛА у картографуванні ґрунтового покриву виступає скоріше додатковою опцією для підвищення якості та точності даних, як підвищення точності меж ділянок

грунтового покриву, так і для кращого візуального сприйняття інформації та уявлення про властивості ґрунтового покриву місцевості.<sup>7</sup>

---

1 Скубиев С.И. Использование беспилотных летательных аппаратов для целей картографии / Тезисы X Юбилейной международной научно-технической конференции «От снимка к карте: цифровые фотограмметрические технологии». Гаета, Италия, 2010.

2 Михайлов А.П., Курков В.М. Повышение эффективности технологий создания цифровых топографических и кадастровых карт по материалам аэрофотосъемки // Сб. докладов международной научно-технической конференции, посвященной 225-летию МИИГАиК. — М.: МИИГАиК, 2004

3 F. Leberl, J. Thurgood<sup>2</sup>, The Promise of Softcopy Photogrammetry Revisited, ISPRS 2004, Istanbul

## **2.6 Виконання зйомки абразивного рельєфу за допомогою БПЛА**

Головним недоліком наземних методів зйомки абразивного рельєфу є неможливість охоплення великих територій, великі витрати кадрових ресурсів й низька швидкість обробки даних. Вивчення високих абразивних берегів неможливо за використання стандартного набору геодезичних методів вимірювання, адже майданчик для встановлення обладнання має бути розташований на водній поверхні, що звісно ж унеможлиблює його стабільне положення. Раніше для подібної зйомки використовувався фотограметричний метод. Отримані стереопари знімків підлягали геометричній і оптичній корекції, а також фінальну фотограметричну обробку. Другою проблемою при зйомці з водної поверхні була неможливість точної прив'язки до системи координат, а також використання дорогого обладнання й подальшої складної обробки отриманих матеріалів, що не дозволяло використання подібних методів при першій необхідності.

Першим надійним методом зйомки абразивного рельєфу стало лазерне сканування рель'єфу з подальшою комп'ютерною обробкою. Використання повітряних носіїв у комбінації з лазерним скануванням дозволяло отримувати задовільну щільність точок на майже необмежених за площею ділянках. Наступним кроком для підвищення якості моделей рельєфу стало комбінування наземного і повітряного лазерного сканування та космічних знімків. Однак все ж таки відкритим залишалось питання встановлення лазерного вимірювального спорядження на водній поверхні.

Гідним рішенням цього питання стала зйомка за допомогою БПЛА, для проведення локальної зйомки рельєфу й створення ортофотопланів місцевості й створення цифрових моделей рельєфу. Для виконання такої зйомки необхідно використання малогабаритних безпілотних літальних апаратів обладнаних цифровою камерою, системою GPRS, системою стабілізації та

будь-яким додатковим обладнанням необхідним для проведення дослідження.<sup>8</sup>

---

1 Li R., Ma R. and Di K. 2002. Digital Tide-Coordinated Shoreline. *Marine Geodesy*, 25

2 А.П.Михайлов, Эдгар Рубен Монтель Андраде. «Фотограмметрический метод мониторинга состояния морских и океанских побережий по материалам аэрофотосъемки», *Известия ВУЗов «Геодезия и аэрофотосъем-ка»*, № 3, 2013 г.,

3 Дуда П.И., Волков В.В., Фурса А.И. Определение координат точек по крупномасштабным снимкам, получаемым малогабаритными летатель-ными аппаратами.//*Маркшейдерское дело и геодезия: Межвузовский сборник научных трудов./СПГТИ.- СПб, 1997*

## **Розділ 3. Методи цифрової обробки даних, отриманих за допомогою БПЛА**

### **3.1 Комбінування методів дистанційного зондування і зйомкою за допомогою безпілотних літальних апаратів**

Можливість дистанційно досліджувати геосферу є складовою багатьох сфер діяльності людини у 21му столітті. Як військові так і громадські установи активно використовують можливість оперативного отримання даних про об'єкти, процеси та явища на поверхні Землі. Наукова спільнота також зацікавлена у прогресивних методах отримання необхідної інформації для проведення тих чи інших досліджень, маючи можливість проводити високооперативний моніторинг геосистем та антропогенної обстановки. До недавнього часу методи супутникового дистанційного зондування місцевості вважалися найбільш оперативним, об'єктивним та прогресивним методом дослідження.

Звісно, використання БПЛА не дає можливості охопити масштаби зйомки, доступні супутниковій зйомці. Про те безпілотні літальні апарати дають значно більшу свободу дій, допомагають побачити нові аспекти особливості взаєморозташування об'єктів, а також особливості досліджуваної території. Саме доповнення супутникових знімків, використовуючи БПЛА є найоптимальнішою комбінацією, адже такий підхід дає можливість використовувати масштаби супутникових зображень і високу роздільну здатність фотоапаратури, що встановлена на безпілотних літальних апаратах.

За роздільною здатністю знімків з БПЛА можуть конкурувати лише космічні знімки високої і надвисокої роздільної здатності 1-10м. і 0.3-1м відповідно. Поява супутникового обладнання з високою роздільною здатністю знімків почало витісняти аерофотозйомку на межі 21 сторіччя, не зважаючи на усе ще вищу якість зйомки і «гнучкість» аерофотозйомки. Але останнім часом, з появою безпілотних літальних апаратів, а також можливістю обладнання, що

дозволяє проводити зйомку у різних спектрах, такий метод встиг стати класичним у топографічній зйомці.

Яскравими прикладами новітніх систем зйомки поверхні Землі є мережа супутників WorldView4, обладнані телескопами GeoEye Imaging System2. Точність такого обладнання становить від 31 до 124см в залежності від вибору класичної або багатоспектральної зйомки. А точність визначення геопозиції складає від 4 до 6.5 метрів без використання мережі наземних опорних точок.

Система GeoEye може проводити багатоспектральну зйомку у наступних діапазонах: 1. VNIR (Visible and Near Infrared) – мультиспектральний видимий і ближній інфрачервоний діапазон; 2. SWIR (Shortwave Infrared)- зйомка у середньому інфрачервоному діапазоні, що дозволяє вести зйомку через туман, хмари, пил, дим, туман, смог; 3. CAVIS (clouds, aerosols, vapors, ice, snow)- режим зйомки у поганих метеорологічних умовах.

Також великою перевагою у порівнянні з БПЛА є можливість отримувати велику кількість знімків, а також можливість швидко переводити фокус з одного об'єкту на інший. Супутник обладнаний системою, що дає можливість ефективно змінювати положення у просторі. Таким чином один знімок охоплює площу в 15км<sup>2</sup>, а максимальна площа зйомки за один оберт навколо Землі складає 15 000км<sup>2</sup>. Охоплюючи значні площі за невеликі проміжки часу, а також можливість знімати у багатоспектральному режимі, робить систему GeoEye найтехнологічнішим і одним з найефективніших методів зйомки рельєфу.

Усім нам відомий сервіс «Google maps» використовував можливості GeoEye через можливість проводити маршрутну, кадрову зйомку, а також зйомку у режимі стереопар. Без використання наземних реперних точок за допомогою системи GeoEye може створювати карти масштабу 1:10 000, а з їх використанням – 1:2000.

В завершення варто відмітити, що не зважаючи на уся високотехнологічність супутникового обладнання, обмеження у роздільній здатності знімку, висока ціна експлуатації дозволили БПЛА зайняти свою нішу у галузі картографування місцевості. Дані зібрані на території Європейського союзу свідчать, що за популярністю використання БПЛА, дослідження земної поєверхні займає лише 6%, у свою чергу державним структурам належить 45%, 25%- пожежним, 13%-сільське господарство, 10% енергетика.

### **3.2 Методи проведення цифрової зйомки місцевості за допомогою БПЛА**

Планова зйомка акумулятивних морських берегів відбувається з вертикально встановленим знімальним обладнанням. Для зйомки нешироких, малих за площею об'єктів, як то берегова білянка або пляжі, зйомку проводять з великим значенням перекриття знімків для підвищення точності даних. Використання такого методу допустимо через малий об'єм даних для обробки. При стандартній зйомці великих за площею об'єктів виконується серія паралельних прольотів зі значенням перекриття у 30% для створення ортофотопланів. Зйомка морського абразивного рельєфу часто відбувається в умовах складного рельєфу і потребує додаткової перспективної зйомки, що виконується шляхом нахилу оптичної ості. Такий тип зйомки допомагає краще розпізнавати об'єкти та розуміти їх взаєморозташування в просторі.

Залежно від необхідної якості досліджень, оператор може створити мережу наземних реперів, що у деяких випадках може підвищити точність зйомки до п'яти разів. Така процедура проводиться шляхом нанесення на ґрунт або корінні породи яскравих знаків (коло, хрест...), або встановлення спеціальних геодезичних реперів та визначення їх координат за допомогою високоточних геодезичних систем позиціонування, що працюють найчастіше з системами ГЛОНАСС або GPS.

Зйомка найчастіше проводиться у ручному режимі, за умови простого рельєфу. В умовах складного рельєфу, зйомка проводиться в автоматичному режимі, адже, у разі втрати сигналу з пульта керування, безпілотний літальний апарат продовжить зйомку опираючись на супутникові дані позиціонування й повертається до місця зльоту автоматично.

В залежності від температури повітря, швидкості та напрямку вітру, протяжність польоту може змінюватись. Наприклад, за гарних метеорологічних умов, відзняти маршрут протяжністю в 12 км можна за 4 вильоти. Така зйомка забезпечить дослідника 1500-1600 знімками з повздовжнім перекриттям 60% та поперечним - 30%.

При зйомці рельєфу за допомогою БПЛА параметри висоти мають бути задані оператором, відповідно до характеру рельєфу. Тобто БПЛА завжди має утримувати однакову відносну позначку висоти, а не абсолютну, для отримання знімків однакового масштабу, і їх подальшого перетворення на ортофотоплан або цифрову модель рельєфу. Також, за можливості, бажано проводити комбіновану (вертикальну та перспективну) зйомку у бідь-яких випадках. Адже це значно допомагає знайти середнє значення відстані до об'єкту, якщо присутня похибка, а також уникнути «сліпих плям» під рослинністю та виступаючими частинами рельєфу.

### **3.3 Екстраполяція даних, отриманих за допомогою БПЛА**

На ринку існує безліч пропозицій програмного забезпечення, за допомогою якого можна перенести отримані дистанційні дані на карту. Розберемо цей розділ спираючись на можливості програмного забезпечення Agisoft Metashape, що дозволяє створювати високоточні 3D моделі рельєфу та ортофотоплани. Перевагою такого софту є опція цифрової фотограметрії, що об'єднує сусідні знімки, знаходячи мережу спільних фрагментів, визначає положення камер відносно об'єкту, відстань від об'єктиву до об'єкту,

геометричні характеристики об'єкту... Після «зшивання» точок і утворення їх щільної мережі, будується ортофотоплан місцевості. Наступним кроком є побудова цифрової моделі рельєфу, що при зйомці з висоти 30-50м може давати роздільну здатність у 5см на піксель.

Наступним важливим коком при створенні цифрових моделей рельєфу є фільтрація мережі точок фотограметричної обробки. Така операція має два основних напрямки: 1. Фільтрація аномальних показників висотності рельєфу; 2. Автоматичний поділ точок на групи «поверхня», «антропогенні об'єкти», «рослинність». Здебільшого програмне забезпечення здатне проводити подібний поділ в автоматичному режимі і відсіяти аномальні значення, наприклад птахів, або ж поодинокі кущі. Також окрім точок, що знаходяться вище позначки «норми» рельєфу, також проводиться відсіювання точок, що мають нижчі значення. Після проведення автоматичних виправлень отримані дані в обов'язковому порядку проходять ручну перевірку. Це необхідно через неможливість розпізнавання великих за площею суцільних заростів кущів, трави, дерев. Використання подібних інструментів дозволяє звести до мінімуму шанс похибки при розробці цифрових моделей рельєфу й пришвидшити етап обробки матеріалу. Проте, іноді повний об'єм робіт доводиться проводити у ручному режимі, через некоректне розпізнавання елементів рельєфу, що можуть прийняті за рослинність та, як результат, видалені з моделі рельєфу.

У представленому програмному забезпеченні оператор має задавати різні алгоритми роботи програми, в залежності від типу місцевості, якості й кількості отриманих знімків. Бажана якість цифрової моделі досягається лиш прикладанням старання, часу і потребує високого класу навичок від оператора, що виконує роботу.

Також варто відмітити, що вивчення поверхні рельєфу може проводитись лиш за умови невеликого показника залісненості, де є можливість отримати достовірні показники корінної поверхні. Тобто в умовах зйомки

абразивного рельєфу це не є проблемою, через невелику щільність рослинності на ділянках з активними абразивними або зсувними процесами.

Тож, маючи ряд недоліків, пов'язаних з об'ємом робіт, що здатні виконати БПЛА у порівнянні з супутниковою зйомкою, переваги у якості зображенні, свобода у виборі ракурсів та можливість знімати вертикально розташовані об'єкти, дає значний простір для використання представленого методу у моніторингу та плановій зйомці абразивного рельєфу з різним за складністю рельєфом.<sup>9</sup>

---

1 Simon Hennig, Wolfgang Koppe, Karlheinz Gutjahr, Roland Perko, and Hannes Raggam. Evaluation of radargrammetry dems based on terrasars-x staring spotlight imagery. In 35. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF), number 24, pages 1-8, Cologne, Germany, March 2015.

2 М.Н. Коева, В.П. Петрова, Д.В. Жечев. Геопрофи электронный журнал по геодезии картографии и навигации.

3 Михайлов А.П., Курков В.М. Повышение эффективности технологий создания цифровых топографических и кадастровых карт по материалам аэрофотосъемки // Сб. докладов международной научно-технической конференции, посвященной 225-летию МИИГАиК. — М.: МИИГАиК, 2004,

4 Arens, J.C.; Wright, C.W.; Sallenger, A.H.; Krabill, W.B., and Swift, R.N., 2002. Basis and methods of NASA airborne topographic mapper LIDAR sur-veys for coastal studies. Journal of Coastal Research, 18

5 Eckerstorfer M, Eriksen Ho, Rouyet L, Christiansen HH, Lauknes TR, Blikra LH. Comparison of geomorphological field mapping and 2DInSAR mapping of periglacial landscape activity at Nordnesfjellet, northern Norway. Earth Surf Process Landf. 2018

## **Розділ 4. Моніторинг трансформації рельєфу та гляціальних процесів в умовах високогір'я за допомогою БПЛА.**

### **4.1 Вивчення гляціальних відкладів за допомогою БПЛА та технологією SfM**

Вивчення сидементаційних характеристик гляціальних форм рельєфу може дати чітке уявлення про їх генезис а також про транзитні шляхи осадового матеріалу. Збір інформації про закономірності розміщення груп гляціальних відкладів за їх гранулометричним складом у доданку з даними особливостей рельєфу та звітами попередніх вивчень досліджуваної ділянки, утворюють повний комплекс даних для розуміння особливостей генезису і морфології ділянки.

Особливості гранулометричного складу порід досліджуваної ділянки надає важливу інформацію для реконструкції льодовткової обстановки місцевості, температурного режиму і динамічних характеристик льодовикових мас. Гранулометричні дані також дають змогу інтерпритувати шляхи та масштаби деформацій та руйнування льодовикових мас.

Проведення наземних досліджень ділянки та відбору зразків для гранулометричного аналізу є поширеною світовою практикою при дослідженні льодовикових відкладів. Проте, такий метод має значні недоліки, адже зразки відкладів відбираються лиш у «контрольних» точках, що найбільш точно відображають гранулометричні особливості поширення гляціальних відкладів. Таким чином, при камеральній обробці даних, дослідник має дані лиш з малого відсотку досліджуваної поверхні, й має відтворити актуальну геологічну обстановку місцевості, спираючись на вибірково відібрані реперні точки. Такий метод дає великий шанс похибки, адже при такому способі обробки даних, велику роль грає людський фактор, тобто суб'єктивне бачення проблеми людиною, що виконує завдання.

Використання безпілотних літальних апаратів дає можливість покрити 100% досліджуваної місцевості й звести до мінімуму вплив «людського чиннику» й дати на виході об'єктивний матеріал, що буде максимально точно висвітлювати актуальну геологічну обстановку місцевості.

Такий підхід включає у себе використання напів автоматизованих систем для отримання даних що до гранулометричного складу порід, використовуючи маловисотну зйомку й алгоритми визначення текстури відкладів й розмірів зерен.

#### **4.2 Методи вивчення гляціальних відкладів**

Седиментаційні дані можуть бути отримані за допомогою аерознімків й корегуються шкалою розмірів зерен, а також відсікає поодинокі уламки аномальних розмірів такий метод називається «фото-відсіювання» (рис.1). Такий підхід дозволяє знизити похибку, що виникає при автоматичному обрахунку розмірів зерен. Такий метод може застосовуватися виключно для неконсолідованих відкладів. Для отримання точних даних створюється десять таблиць, що мають інформацію про розміри зерен на окремих ділянках. Дев'ять з них є результатом долідження місцевості й одна є комбінацією долідження місцевості, де результати зводяться до середніх значень (таблиця), для зменшення кінцевої помилки.

Таблиці будуються у значеннях від 1 до 50, де 1-найменший розмір зерна, що зустрічається на ділянці, а 49-найбільший розмір зерен, що регулярно зустрічається на місцевості, 50- поодинокі великі уламки порід, або плями ґрунту (що ідентифікуються програмою як один об'єкт), що вилучаються з обрахунку для отримання вірних середніх гранулометричних значень.

Роллю першої шкали також є виключення з обрахунків об'єктів з «екстримальними значеннями» (поодинокі крупні уламки порід й ділянки

грунту, що не впливають на загальну картину й мають бути вилучені з обчислення для вирівнювання середніх значень )

Основні цілі фотовідсіювання: 1) контролювати і підвищувати точність дани після автоматизованого обчислення розмірів зерен гляціальних відкладів за першою патч шкалою. 2) корегування даних за допомогою таблиць гранулометричних значень місцевості (з другої по десятку), в яких відсутнє приведення до середніх значень . 3) Для вилучення фракції «50» усі отримані дані проходять стадію фотопросіювання. Далі визначається середній розмір зерек кожної ділянки і об'єднуються утворюють єдину шкалу, яка в майбутньому буде відображати гранулометричні особливості поширення гляціальних відкладів.<sup>10</sup>

---

1 Barry, R.G., 2006. The status of research on glaciers and global glacier recession: a review. *Prog.Phys. Geogr*

2 Bhardwaj, A., Sam, L., Martín-Torres, F.J., Kumar, R., 2016. UAVs as remote sensing platform in glaciology: Present applications and future prospects. *Remote Sens. Environ.*

3 Dabski, M., Zmarz, A., Pabjanek, P., Korczak-Abshire, M.g., Karsznia, I., Chwedorzewska, K.J.,

4 2017. UAV-based detection and spatial analyses of periglacial landforms on Demay Point (King George Island, South Shetland Islands, Antarctica). *Geomorphology*.

5 Gindraux, S., Boesch, R., Farinotti, D., 2017. Accuracy Assessment of Digital Surface Models from Unmanned Aerial Vehicles' Imagery on Glaciers. *Remote Sensing*, 9(2).

### **4.3 Моніторинг процесу швидкого танення Альпійських льодовиків за допомогою безпілотних літальних апаратів.**

Відступання льодовиків на території Альп становить велику проблему, що особливо загострилась в останні сорок років. Безпілотні літальні апарати можуть забезпечити найренатбєвнїшу можливість відстежувати часово-просторові зміни в швидкозмінних гляціально-морфологічних особливостей, що пов'язані з гляціальною динамікою території.

Для кращого розуміння матеріалу будуть приводитись дані з реальних досліджень останніх років. У цих дослідженнях було проведено дві зйомки місцевості високої роздільної здатності в регіоні підвищеною динамікою абляційних процесів а території льодовика Morteratsch (Швейцарські Альпи). Спочатку, використавши техніку Structure-From-Motion (SfM) (рис.2), було створено ортофотоплани й цифрові моделі рельєфу гляціальних поверхонь, знятих з декількох ракурсів. Геометрична точність цифрових моделей рельєфу й ортофотопланів була підтверджена глобальною диференціальною навігаційною супутниковою системою (dGNSS) наземних вимірів, й середня точність у 17см була досягнута у обох моделях рельєфу.

Ортофотоплани високої роздільної здатності й цифрові моделі рельєфу дозволяють оперативно отримувати детальні характеристики швидкозмінного гляціального середовища. Порівнюючи дані з пешої та другої зйомки нижньої частини льодовика, була проведена оцінка реакції льодовикових товщ на літню абляцію. Було вділено два райони й класифіковано як: 1) район з середнім потоншенням до 4 метрів, і район з середнім зміщенням льодовика на 3 метри по напрямку руху.

Ці дані були отримані шляхом порівняння різноманітних алгоритмів й підходів, що наочно показало стабільність та якість отриманих результатів. Надалі результати обрахунку просторових картин швидкості танення

льодовику порівнювались з картами яскравості та шорховатості поверхні льодовків, що були отримані при вересневій зйомці льодовика.

Результати обробки даних показали, що відмінності цифрових моделей рельєфу, що характеризують особливості швидкості танення льодовиків були обернено пропорційні яскравості(альbedo) льодовиків. І навпаки, позитивний, але слабкіший зв'язок існував між відмінностями цифрової моделі рельєфу і шорховатістю льодовикової поверхні. Такі дослідження доводять, що фотограметричні дослідження за допомогою БПЛА дозволяють якісно і кількісно оцінювати еволюційну динаміку льодовиків з просторовою роздільною здатністю в сантиметровому масштабі. Дослідження подібних характеристик дозволяють ідентифікувати топографічні зміни поверхні, що пов'язані з літньою абляцією й охоплюють спектр процесів від глобальних, що впливають на увесь льодовик, й до локальних процесів.

Відступання долинних льодовиків по всьому світу є ознакою глобальних змін клімату. Льодовики- цінні джерела прісної води, а зміна їх площі, висоти, об'єму та режиму танення може призвести до майбутніх катаклізмів, пов'язаних з нестачею прісної води. Саме через це існує необхідність у постійному крупномасштабному моніторингу.

Моніторинг льодовиків класичними польовими методами є доволі складною задачею, адже їх віддаленість та «ворожо» налаштовані ландшафти й метеорологічні умови значно ускладнюють збір даних. Другим недоїком польових досліджень є неможливість регулярно охоплювати великі за площею території. Таким чином, за допомогою наземних досліджень, можна отримати лише приблизні дані про стан льодовикового покриву. Також польові дослідження можуть бути доповнені за допомогою супутникового зондування, що дозволяє підвищити достовірність даних, охопивши більші

площі кріосфери й надає інформацію про льодовикові характеристики, як протяжність льодовикового тіла, зміну висоти й ухил поверхні.

Проте, моніторинг льодовиків а допомогою супутникового зондування має обмеження у вигляді просторових і часових рамок. За умов використання БПЛА можливо уникнути багатьох недоліків, властивих методу, що розглядався вище, при дослідженні льодовиків. З кожним роком використання цього методу стає усе більш популярним й використовується для ряду геоморфологічних і екологічних досліджень як моніторинг зсувів, річковий морфодинамічний аналіз, вивчення рослинного покриву, вивчення льодовикових процесів.

БПЛА забезпечують гнучкість повторних зйомок надаючи доступ до просторово-часових особливостей рельєфу, підвищуючи можливість отримувати кількісні та якісні дані про зміну стану гляціальних ландшафтів, що мають тенденцію швидко змінювати свої характеристики.

Крім того, зниження витрат на Платформи БПЛА та експлуатаційні обмеження, разом із розробкою простих у використанні методів для генерування топографічних даних з високою роздільною здатністю із отриманих зображень БПЛА пришвидшило розповсюдження досліджень на основі БПЛА в геоморфологічних дослідженнях за останні роки.

Останнім часом безпілотні літальні апарати літакового типу успішно використовуються для огляду ділянок льодовикового рельєфу та абляційних умов альпійських льодовиків.

Проте використання БПЛА в альпійській гляціології все ще обмежене через бідність доступність високогірних льодовиків та труднощі при належному матеріально-технічному забезпеченні. Характеристика просторово неоднорідних та динамічних гляціологічних процесів все ще залишається складним завданням для отримання економічно ефективних комерційних БПЛА.

У цьому дослідженні було проведено дві зйомки БПЛА з високою роздільною здатністю у липні та вересні 2016 року на території льодовика Мортерач. Це великий льодовик з долинами, розташований у швейцарських Альпах. Цей льодовик обраний для дослідження з високою роздільною здатністю морфологічних та динамічних особливостей його області абляції через відповідні розміри та відносно легкий доступ. Льодовик Мортерач майже безперервно відступав з кінця Малого льодовикового періоду, і швидкість його танення зросла за останні роки. Ймовірно цьому сприяла зміна кліматичних умов, що призвела до підвищення температури і зменшення вологості повітряних мас та скупчення пилу на поверхні льодовика. Просторова диференціація річних норм танення льодовика обумовлена різницею в балансі поверхневої енергії між різними місцями і контролюються за топографічними особливостями та поверхневими умовами, як шорсткість та альbedo поверхні.

У даному розділі оцінено потенційне використання ортофотопланів та цифрових моделей рельєфу і досліджували використання цих підходів, щоб:

- 1) характеризувати льодовикові морфологічні особливості з використанням високоточної зйомки рельєфу;
- 2) оцінити просторово-часову еволюцію льодовика;
- 3) оцінити зміни висоти поверхні льодовика протягом літа, коли абляція досягає максимальної інтенсивності;
- 4) дослідити роль зміни показника альbedo поверхні льодовика (що впливає з карти яскравості, отриманої за допомогою побудови ортофотоплану, на основі даних, отриманих за допомогою БПЛА) та шорсткості поверхні льодовика.

### **4.3.1 Територія дослідження**

Льодовик Мортерач є типовим альпійський долинним льодовиком, який знаходиться в масиві Берніна (4049 м. Раєтські Альпи Швейцарія-Італія) (рис. 3). Це складна льодовикова система з головною притокою на схилі хребта Берніна від східної вершини Пік Камбрена (3601м) до західної вершини Пік Мортерач (3751 м). Зйомка за допомогою БПЛА проводилася між 13:00 та 15:00, щоб уникнути двонаправлених котнурів об'єктів, спричинених низькими зенітними кутами сонця.

### **4.3.2 Наземні контрольні точки**

Під час розробки маршрутів БПЛА було встановлено 24 та 29 контрольних точок (перша та друга зйомка) були рівномірно розподілені по льодовиковій поверхні у липні та вересні відповідно (рис. 4). Приблизно 60% цих контрольних точок використаний для генерації ортофотопланів та ЦМР, тоді як решта 40% була використана для проведення незалежної перевірки сформованих моделей. Це означає, що для липневої зйомки 9 з 24 контрольних точок використовувались як наземні пункти перевірки точності даних, тоді як для вересневої 12 з 29. Координати GCP та GVP (контрольні точки корекції координат по горизонталі і вертикалі відповідно) були отримані за допомогою диференціальної глобальної навігації геодезичних приймачів супутникової системи (dGNSS) (Topcon HiPer Pro та Topcon GPR-1), в якому дотримувались техніки швидкого статичного вимірювання.

Одночасно використовувались три пристрої GNSS: головний та два мобільних пристрої. Головна станція була встановлений на вершині валуна біля фронту льодовика Мортерач, який використовувався як статична контрольна точка для обстеження GNSS(глобальна навігаційна супутникова система). Для вимірювання центральних точок кожного GCP використовували два мобільних пристрої визначення географічного положення.

Щоб забезпечити ідентифікацію GCP, контрольні точки були розміщені на поверхні льодовика як червоні кола, надруковані на товстих паперових аркушах (297 x 420 мм). Ці листи були закріплені на поверхні льодовика з використанням металевих кіл, що міцно утримували їх у заданому положенні. Центральну точку кожного GCP вимірювали, тримаючи БПЛА над ним точку протягом щонайменше 4 хвилин і вимірювання щосекунди з принаймні 6 супутниками, які мали зв'язок з приймачем, відповідно до протоколу.

Основні дані та дані мобільних пристроїв були оброблені з використанням програмного забезпечення Topcon Tools. Система dGNSS, яка використовується під час досліджень, має точність по горизонталі 3 мм + 0,5 та вертикальна точність 5 мм + 0,5 відповідно до специфікації Topcon HiPer Pro. Використовуваний dGNSS може досягти точності до 10 мм, застосовуючи відповідну техніку, однак, для досягнення цієї точності, мають бути оптимальні конфігурації супутників та сприятливі атмосферні умови.

#### **4.3.3 Формування ортофотопланів та цифрових моделей рельєфу**

Зображення, зібрані під час кожного опитування БПЛА, були оброблені в ортофотоплани та ЦМР на основі даних зйомки льодовика та безпосереднього оточення за допомогою алгоритму SfM.

Першим етапом обробки був вибір фотографій з достатньою якістю та перекриттям з кількох позицій або кутів. Потім ці зображення вирівнювались за допомогою функції розпізнавання зображень та алгоритму, подібному до методу перетворення інваріантних ознак шкали Лоу, який автоматично виявляє та поєднує унікальні характеристики й особливості зображення, які автоматично обирають потрібні варіації перспектив та освітлення вхідних фотографій. Далі, подібний алгоритм був використаний для реконструкції 3D-геометрії та положення камери з послідовністю двовимірних зображень,

отриманих з багатьох точок зйомки, і а для цих функцій була створена розріджена хмара точок. Вбудовані навігаційні датчики дозволяли визначити положення камери та 3D-хмари точок для автоматичної геоприв'язки з необхідною точністю. Потім GCP були ідентифіковані на зображеннях вручну та їх координати dGNSS були імпортовані для оптимізації просторової точності та поліпшення геометрії 3D-хмари точок.

Послідовно застосовувався алгоритм узгодження стереозображень із декількома переглядами для збільшення щільності хмари точок і для перетворення хмар точок (що складається приблизно з 160 0000 і 250 0000 точок у липні та вересні відповідно) у ЦМР та ортофотомозаїки. Для реконструкції було обрано налаштування фільтрації “Середня” якість та “Помірна” глибина щільні хмари точок і створюють ЦМР та ортофотографії, які дали остаточну роздільну здатність 0,2 та 0,05 м для ЦМР та ортофото, відповідно.

#### **4.3.4 Точність ЦМР та ортофотопланів**

Дані dGNSS, отримані під час двох зйомок, досягли горизонтальної точності 1,5 см та вертикальної точності 2 см, після подальшої обробки за допомогою програмного забезпечення Topcon Tools. Точність моделей, створених за допомогою PhotoScan, оцінювали на основі GCP, що використовуються для генерації моделі, і GVP, що використовуються для оцінки точності моделі по вертикалі.

#### **4.3.5 Різниця між двома ЦМР**

Дві ЦМР та ортофотоплани були порівняні для кількісного вивчення льодовикових змін протягом літнього сезону абляції. Для оцінки була розрахована різниця між двома ЦМР втрата льоду між двома дослідженнями за допомогою БПЛА. Просторовий розподіл різниці висот між цими двома дослідженнями повідомляється на рис. 5. Сині кольори вказують на велику

кількість втрат льоду, тоді як червоні кольори означають зміни обсягу між двома дослідженнями. Основний режим зосереджений на -3,4 м і являє собою загальне зменшення льодовикової поверхні між двома дослідженнями. Інший режим з центром на 0 м представляє перепади висот між липнем і вереснем у позальодовиковій місцевості і підтверджує точне вирівнювання цих двох ЦМР у вертикальному напрямку. Як і очікувалось, у районі, охопленому двома обстеженнями, загальне зниження поверхні в літній сезон абляції внаслідок танення льодовиків становило -4,1 м.

Показники вересень та липень добре узгоджується із значеннями, що спостерігались між 1995 та 2006 р. на відносно рівнинній частині льодовика.

Типове середнє зниження поверхні за рік становило приблизно -6,3 м льоду на рік, при цьому зниження було близько -4 м у період між 6 липня та 13 вересня, і це добре узгоджується з оцінками дослідження. Крім того, реконструкцію балансу маси льодовика Мортерач можна порівняти з даними спостереженнями, які показали щорічне зниження поверхні на -7 м при 2200м. Ці результати підтверджують надійність досліджень за допомогою БПЛА.

Припускаючи середню щільність льоду  $850 \pm 60$  кг / м<sup>3</sup>, різниці висот льодовика між 6 липня і 13 вересня були перетворені на втрату льоду, що призвело до об'ємних втрат  $490 \times 103$  м<sup>3</sup> і втрата маси  $0,42 \pm 0,03$  тон на метр<sup>2</sup>. Ця оцінка була зроблена на тій частині льодовика, для якої вдалося визначити різницю між двома ЦМР, тобто площею досліджуваного льодовика протягом двох кампаній (рис. 7).

Щодо просторового розподілу змін висоти, льодовик показав більш виражене танення у нижній і західній частинах язика. Ми можемо припустити, що високий показник мінеральної складової покриває цю частину язика, пришвидшуючи ефект танення. Подібні абсолютні відмінності та просторові закономірності також були отримані при зміні висоти льодовика, обчислюється за допомогою алгоритму, який був реалізований в програмному забезпеченні CloudCompare. Результати різниці між дослідженнями представлені на рис. 6

#### **4.3.6 Візуальні та автоматичні вимірювання переміщень на ортофотоплані**

Перший аналіз переміщення поверхні льодовика проводиться шляхом відбору вручну приблизно 40 чітко визначених уамоків на ортофотоплані, які були відібрані протягом двох досліджень. Льодовикові межі були позначені червоними лініями на липневому ортофотоплані та зеленими лініями на вересневому. Потім величини переміщення для кожного елемента були накладені на вересневий ортофотоплан, як показано на рис.7. Ручні вимірювання виявили значну поверхню рухів. Переміщення були розподілені нерівномірно. Основний язик зповз на 3 м. Найвищі значення переміщень (до 10 м) були локалізовані на межі між льодовиковим язиком і вкритим уламками льодом, на який палали значні уламки моренних відкладів як наслідок безперервного танення льоду. Нижчі значення спостерігались на східному кордоні через більше тертя вздовж стін долини.

Цей візуальний аналіз послужив основою для автоматичного розрахунку переміщень які були отримані за допомогою програмного забезпечення ImGRAFT. Відносні переміщення між двома дослідженнями обчислювались за допомогою порівняння зображень та відстеження об'єктів набором інструментів ImGRAFT й показували результати алгоритму ImGRAFT у вигляді векторних полів, нанесених на карту значеннями від 6 липня до 13 вересня 2016 р. Чорні вектори вказують обчислений напрямок руху, а довжина векторів пропорційна величині переміщення. ImGRAFT склав послідовну карту величини переміщення льодовика Мортерач. Обчислювані переміщення коливалися від 0 до 8 м. На малюнку чітко видно надзвичайно динамічний характер льодовикового язика. Протягом двох місяців основний язик премістився вниз по схилу приблизно на 3 м. По краях льодовика, особливо західний край, результати обчислення переміщення показали менш чітку картину. Алгоритм, ймовірно, враховував хаотичні рухи деяких скельних

блоків. Крім того, алгоритм був, не в змозі визначити чіткі межі, оскільки абляція була достатньо інтенсивною. Танення льоду запобігло збереженню форм і конструкцій протягом розглянутих часових інтервалів, що заважало правильній оцінці зсуву льодовиків. Області, де алгоритм не міг визначити коректну схему переміщення, відповідала областям, де втрата льоду була максимальною. На протилежному боці алгоритм правильно визначив периглаціальні області та показав розрахункові переміщення близько до нуля. Слід також згадати, точність зйомки за допомогою БПЛА погіршується по краях моделі, де контрольні точки можуть змінювати своє положення за короткий проміжок часу. Як наслідок, точність карти зменшується в напрямку периферії льодовика.

#### **4.3.7 Підсумки дослідження**

Це дослідження демонструє, що точні ортофотоплани та ЦМР льодовика можна отримати за допомогою даних, отриманих за допомогою БПЛА з застосуванням алгоритмів SfM. Ці техніки дозволяють створювати точні ортофотоплани та ЦМР, які можна регулярно використовувати для моніторингу швидкоплинних морфологічних характеристик льодовиків. Точність техніки SfM була підтверджена приблизно 30 наземними контрольними точками dGNSS, що призвело до загальної середньої похибки 14 см для обох ортофотопланів. Порівняння даних, зібраних на початок (липень), та дані, зібрані наприкінці (вересень) сезону абляції 2016 дало змогу оцінити величину втрат льодовикових мас протягом одного сезону та для відстеження зміщення льодовика за той самий інтервал часу. Як і очікувалося для типового альпійського льодовика було виявлено загальне потоншення льоду. Середня різниця висот -4 м спостерігалась як на основі пікселів ЦМР, так і при тривимірній різниці між хмарами точок з двох досліджень. Одночасно льодовик прямує вниз по схилу приблизно на 3 м, як виявили обидва ImGRAFT алгоритми та візуальна інтерпретація переміщень. Об'єми

втрати льоду, розраховані в регіоні абляції Мортерач, підтверджують попередні дані, опубліковані всесвітньою службою моніторингу льодовиків . Ці висновки вказують на те, що 2016 рік характеризувався майже рекордними середніми температурами на більшості територій Європи, і буде 37-м роком поспіль без позитивного річного балансу льодовикової маси. Це дослідження демонструє, що висока роздільна здатність зображення може забезпечити точні оцінки поверхневої швидкості та льодовикової динаміки, що є важливим для кращого розуміння балансу льодовикової маси. Підхід запропонований у цьому дослідженні дозволив одночасно враховувати поверхневу абляцію, льодовикову шорсткість, вплив світлопоглинаючих домішок на оптичні властивості льодовика, текучість льоду, поверхневий переміщення льодовикових мас та значення мінеральних частинок на поверхні льодовика. Такі спостереження можна отримати при великих роздільних здатностях фотоапаратури (кілька см) і малими часовими рамками роботи (кілька місяців) з використанням комерційних платформ БПЛА. Цей метод є особливо вдалим і підходить для важкодоступних льодовиків, у яких можна отримувати ЦМР й ортофотоплани з високою роздільною здатністю й надати корисну та додаткову інформацію до традиційних польових методів. Однак, для проведення точних досліджень балансу льодовикових мас, необхідно покривати повні площі басейнів льодовикового водозбору. Це може бути надзвичайно складно при вивченні великих льодовиків, але БПЛА все одно можуть забезпечити дослідника важливою інформацією про зміни, що протікають у зоні абляції. <sup>11</sup>

---

1 Di Mauro, B., Fava, F., Ferrero, L., Garzonio, R., Baccolo, G., Delmonte, B., Colombo, R., 2015.

Mineral dust impact on snow radiative properties in the European Alps combining ground, UAV, and satellite observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(12)

2 James, M.R., Robson, S., d'Oleire-Oltmanns, S., Niethammer, U., 2017. Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. *Geomorphology*

3 Gao, J., Liu, Y., 2001. Applications of remote sensing, GIS and GPS in glaciology: a review. *Prog.Phys. Geogr.*, 25(4)

4 Lowe, D.G., 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2),

5 Agisoft Photoscan Professional. Available online: <http://www.agisoft.ru/> (accessed on 29 June 2017). Barnhart, T., Crosby, B., 2013. Comparing Two Methods of Surface Change Detection on an Evolving Thermokarst Using High-Temporal-Frequency Terrestrial Laser Scanning, Selawik River, Alaska. *Remote Sensing*, 5(6),

6 Kääh A, Girod L, Berthling I. Surface kinematics of periglacial sorted circles using structure-from-motion technology. *The Cryosphere*.

2014

7 Oerlemans, J., Giesen, R.H., Van den Broeke, M.R., 2009. Retreating alpine glaciers: increased melt rates due to accumulation of dust (Vadret da Morteratsch, Switzerland). *Journal of Glaciology*

8 Pellicciotti, F., Brock, B., Strasser, U., Burlando, P., Funk, M., Corripio, J., 2005. An enhanced temperature-index glacier melt model including the shortwave radiation balance:

development and testing for Haut Glacier d'Arolla, Switzerland. *Journal of Glaciology*

---

#### **4.4 Вивчення динаміки та картографування соліфлюкційних процесів на основі зйоми БПЛА**

Соліфлюкція - один із найпоширеніших периглаціальних процесів з низьким річним показником швидкості руху в діапазоні від декількох міліметрів до декількох метрів. Традиційні методи оцінки руху соліфлюкції зазвичай мають низьку просторову роздільну здатність, що ускладнює розуміння просторових моделей руху та факторів, що керують ними. У цьому дослідженні, перевірено придатність безпілотного літального апарату в порівнянні з традиційним тахеометричним дослідженням для моніторингу переміщення ґрунтово-дернових соліфлюкційних валів (далі ГДВ) в долині Туртман (Швейцарія). Метою є порівняти виявлені моделі руху з потенціалом геоморфометричного, матеріального, теплового та рослинного режиму, який був оцінено з використанням геоморфологічних карт та карт рослинності, реєстраторів температури. Результати показують, що картографування на основі БПЛА може виявити соліфлюкційний рух з високою просторовою роздільною здатністю (одна точка на  $m^2$ , всього > 900 контрольних точок). Такі показники та закономірності відповідають обстеженню тахеометричним методом, але вимагають ретельного налаштування та аналізу вимірювань. Відмінності можна пояснити різним рослинним покривом неоднорідним уламковим матеріалом, геоморфометричними, тепловими властивостями ГДВ, що є основними параметрами розвитку соліфлюкційних процесів. Це дослідження демонструє ефективність картографування за допомогою БПЛА у дослідженнях соліфлюкційних процесів та покращує наше розуміння процесів соліфлюкції та розвитку рельєфу.

Соліфлюкція - повільна в'язкопластична течія перезвожених ґрунтових мас схилами під дією змінного замерзання-танення та сили тяжіння. Розвивається в областях багаторічної мерзлоти. Соліфлюкція відіграє

суттєву роль у формуванні рельєфу зумовлює виникнення специфічних його форм - валів, гряд, терас, тощо.

Швидкість руху соліфлюційних товщ порівняно низька, як правило, від міліметрів до сантиметрів на рік. Соліфлюкція сприяє транспортуванню наносів і загального їх відступання вниз по схилу. Соліфлюкція може постійно переробляти схиловий матеріал у вигляді листів соліфлюкції або створювати більш чіткі соліфлюкційні форми рельєфу, що складаються з валів або листів. Такі форми рельєфу називаються соліфлюкційними терасами. Якщо поверхня таких форм рельєфу вкрита ролинністю, їх називають соліфлюкційно-дерновими, а якщо переважає грубоуламковий матеріал - соліфлюкційно-кам'янистими. Фактори, що контролюють розвиток соліфлюкції, включають такі властивості, як текстура ґрунту та вологість, ухил поверхні, кліматичний режим, включаючи температуру повітря та ґрунту та сніговий покрив, і режим багаторічної мерзлоти.

У масштабах соліфлюкційного рельєфу, використання безпілотних літальних апаратів або технологія SfM показала хороші результати у виявленні геоморфологічних змін з високою просторово-часовою роздільною здатністю перигляціальної геоморфології, фотограметрія SfM успішно застосовується в кількості науково-дослідних проектах, включаючи картографування рельєфу, моніторинг утворення льодових об'єктів, оцінка швидкості руху гірських льодовиків.

Однак наскільки нам відомо, фотограметрія SfM на основі БПЛА тільки починає застосовуватись для визначення швидкості руху соліфлюційних товщ та вивчення закономірностей щодо властивостей навколишнього середовища. Картографування за допомогою БПЛА може забезпечити зйомку з високою роздільною здатністю, ця нова техніка може допомогти зрозуміти просторову неоднорідність руху соліфлюкційних товщ. У поєднанні з точними даними щодо потенційного контролю соліфлюкції, це також може покращити

наше розуміння динаміки та розвитку рельєфу. Отже, цілями такого дослідження є:

1. Оцінити придатність фотограметрії SfM на основі БПЛА для відображення руху солюфлюкційних товщ в ГДВ.
2. Кількісно визначити просторові закономірності руху солюфлюкційних товщ.

#### **4.4.1 Досліджувана область**

Досліджувані ГДВ знаходяться між 2170 і 2185 м на моренному схилі периферії льодовика Туртмана (рис. 8а). Моренний схил, що був утворений у наслідок просування льодовика Туртмана у 1925 році.

Моренний матеріал складається з мармуру, гнейсів, вапняків, сланців та габро. Середньорічні температури повітря, отримані від кліматичної станції на висоті 2180 м над рівнем моря на льодовику у 2014 і 2017 роками від 1,8 до 3,89 °С, а річна кількість опадів становила від 720,4 до 835,4 мм. Досліджувана площа розташована на 250–300 м вниз по схилу від нижньої межі вічної мерзлоти. Самі ГДВ становить 29 м в довжину і до 14 м в ширину (рис. 8b), з ухилом, 22° тоді як поверхня ковзання 23°. Висота центрального валу досягає 1,8 м і складається з декількох ступеней, а бічні вали мають висоту до 1 м.

#### **4.4.2 Методи дослідження**

Зйомка за допомогою БПЛА, фотограмметрична обробка даних та моніторинг руху.

Для оцінки руху ГДВ проводили зйомку БПЛА 14 серпня 2014 року та 17 серпня 2017 року. Зйомка БПЛА 2014 року було здійснена за допомогою

спеціального Mikrokoetter (HiSystems GmbH, оснащений Panasonic Lumix GX1, 16 Мп, і 22 мм фіксованої фокусної відстані), проведених вручну на висоті приблизно 15 м. Аерофотознімки (416 зображень) були оброблені в Agisoft Photoscan (версія 1.2.6). Відповідний підхід SfM включає виявлення ключових точок, які використовуються для оцінки камери положення кожного зображення. Хмара точок (відповідні ключові точки) була побудована на основі п'яти вимірюваних наземних контрольних точок (GCP) за допомогою диференціального GPS (Leica GPS1200 GNSS з RTK) з точністю близько 2-3 см. Використовуючи триангульовані зображення та розріджені хмари точок, був проведений процес ущільнення (Multi View Stereo, MVS) для створення так званої щільної хмари точок. На основі на щільної хмарі точок створюється цифрова модель поверхні ЦМР. Створені таким чином ЦМР та ортофотоплани мають просторову роздільну здатність 2 см і точність 5 см. Зйомка БПЛА 2017 року була проведена за допомогою Phantom 4 Pro + (вбудована 20-мегапіксельна камера, 24-мм фіксована фокусна відстань), зйомка була проведена вручну на висоті 15–20 м. На основі 15 контрольних опорних точок, наприклад, маркери на нерухомих гірських породах (рис. 1с). Аерофотознімки 2017 року (всього 564 зображення) були відображені на ортофотопані 2014 року. Координати для стабільних опорних точок були використані з ортофотопану 2014 року та ЦМР.

Потім спільна реєстрація точок була проведена в Agisoft Photoscan (версія 1.4.0), де стабільні контрольні точки використовувались як основні контрольні точки для оптимізації зображення. Згодом було отримано ЦМР та ортофотоплан з роздільною здатністю 2 мм. На ортофотоплані було здійснено ручне відстеження динамічних змін в ArcGIS за допомогою сітки розміром 1,5 × 1,5 м, розміщеної на ортофото, що використовувався для орієнтації. У попередніх геоморфних дослідженнях льодовика руху, ручне відстеження особливостей показало хороші результати у порівнянні з автоматичними методами. Критерії вибору контрольних точок включали:

1. високу видимість і впізнаваність в обох ортофотопанах.
2. Дискретні, чіткі та легко впізнавані межі об'єктів.

Прикладами реперних точок є невеликі плями лишайника і моху на більших уламках (рис. 1d), а також краї гальки, каменів та гірських порід (рис. 1e). Щільний рослинний покрив сильно обмежує відстеження ознаки реперних точок, і жодних дискретних функцій для збігання цьому виявити не вдалося. Загалом було виявлено 975 реперних точок на площі 867 м<sup>2</sup> для обрахування переміщення соліцлюкційного шару на основі відстані між об'єктами в 2014 році та 2017 р.

#### **4.4.3 Швидкість та закономірності руху соліфлюції**

Результати особливостей моніторингу на ортофотоплані з 2014 та 2017 років показують, що дані поверхневих переміщень у розглянутій області коливаються від 0 до 16,5 см протягом 3 років (0–5,5 см на рік ), з ГДВ рухається швидше, ніж оточуючий схил (рис. 2a) Точність реєстрації для двох ортофотопланів становить 0,8–4,8 см, припускаючи можливу помилку у виявлених показниках переміщення близько 3,05 см (середня помилка реєстрації). Дослідження показує що середні показники переміщення суттєво різняться між ГДВ та оточуючим схилом. Середня швидкість переміщення оточуючого схилу становить 2,0 см за 3 роки (0,66 см на рік ) (рис. 9a). Найбільше переміщення оточуючого схилу (> 3–5 см за 3 роки) трапляється на захід та південний схід від (ГДВ), здебільшого на терасах (рис. 2a). Більш д цікаві молотомасштабні переміщення з'являються на хребті та західному бічному валі та біля хребта, нерегулярне переміщення дрібних уламків між 2014 та 2017 рік також можна відстежувати. Дрібноуламковий матеріал сильно змінив своє положення та орієнтацію протягом цього періоду часу (рис. 2b). Результати вимірювань тахеометрів показують подібні закономірності переміщення для обстежуваних пунктів у період з 2014 по 2015 рік (Рис. 2c) із

середньою швидкістю 0,83 см на рік. Найбільш і значущі (> 2 см на рік ) переміщення виявлені у східних нижніх ступінчастих ділянках із середньою швидкістю 2,18 см на рік. Чітка тенденція , що вказує на повільне сповзання матеріалу, простежується в більшості частин схилу, хоча на деяких ділянках було виявлено незначне зміщення в сторону східної частки схилу. Стабільні маркери мають середнє значення різниці у 0,36 см між 2014 і 2015 роками. Однак ці відмінності знаходяться в межах очікуваної точності вимірювання станції, тому маркери вважаються стабільними й придатними для використання.

#### **4.4.4 Застосовність фотограмметрії на основі БПЛА для відображення руху соліфлюкції**

Підхід до картографування на основі БПЛА забезпечує високу просторову роздільну здатність при моніторингу швидкості руху соліфлюкційних процесів. У порівнянні з попередніми підходами з використанням тахеометру, показники по точності відповідають доручимим значенням відхилення від більшості реперних точок (загалом для дослідження було створено 975 точок). Через високу просторову роздільну здатність є можливість визначити схеми руху усього рельєфу досліджуваної ділянки, а також створити детальні схеми руху на окремих елементах ділянки. Диференціювати рух за елементами рельєфу зазвичай неможливо відстежити за допомогою традиційних методів, таких як лінійні вимірювання та за допомогою тахеометрів, які покладаються на меншу кількість маркерів. Картографування за допомогою БПЛА також забезпечує дослідника інформацією про просторові особливості рельєфу, такі як ухил поверхні, екологічна інформація, така як зміна рослинності (рис. 10 а, б). Подібні дані можуть бути цінним матеріалом у біогеографічному дослідженні, що пов'язує рослинність та динаміку рельєфу.

Картографування на основі БПЛА і традиційні методи вимірювання демонструють подібні схеми руху (рис. 8а, б) з найвищими середніми швидкостями переміщення (~ 2–2,4 см на рік), що спостерігаються у нижній східній частині схилу. Такий підхід до картографування на основі БПЛА також має кілька обмежень через різні джерела помилок. По-перше, середня помилка реєстрації (3,05 см) набагато перевищує середній рівень переміщення на рік у ГДВ (1,55 см) і вище, ніж помилки, отримані традиційними лінійними вимірюваннями (1 см) та вимірюваннями диференційованою станцією GPS (<1 см).

Таким чином, деякі з моделей переміщення можуть бути пояснені помилками в системі вимірювань, які розповсюджується через неправильну фотограмметричну обробку. Попередні дослідження спостерігали радіальне спотворення цифрових моделей висот, створених за допомогою БПЛА, та деформації по краях ортофотопланів. Радіальні спотворення або деформації хмарних точок можуть пояснити закономірностями переміщення матеріалу на схилі, особливо на південно-східній та північно-західній окраїні ділянки (рис. 8а). Альтернативне пояснення утворення помилок - це солюфлюкційні тераси, які рухаються швидше, ніж решта схилового матеріалу. Нарешті, помилки в показниках переміщення, можливо, також виникли через антропогенні зміни, оскільки було проведено два дослідження, між якими спостереження за ділянкою не проводились.

На відміну від більшості інших досліджень, у даному випадку використовувався підхід ручного відстеження особливостей на аерофотознімках для визначення солюфлюкційних рухів. Хоча ручний підхід може зайняти багато часу в порівнянні з автоматичним моніторингом, для визначення зміщення поверхні, ця методика також має ряд переваг. Для наших даних автоматичний моніторинг був протестований, але не застосовувався, головним чином через щільний рослинний покрив який обмежив вибір функцій. За допомогою ручного відстеження є можливість вибрати найбільш

вдалі комбінації для моніторингу, незважаючи на різні умови освітленості, тіні та рослинний покрив (рис. 10а, б).

У даному дослідженні був використаний новий підхід на основі БПЛА для створення карт руху соліфлюкційних товщ та ГДВ у периферії льодовика Туртмана, Швейцарії. Результати показують, що:

1. Фотограметрія SfM на основі БПЛА є гарним інструментом для відображення руху з високою просторовою роздільною здатністю (одна точка на м<sup>2</sup>, усього > 900 точок). Виявлені швидкості переміщення (в середньому 1,55 см рік) і закономірності відповідають результатам традиційних методів дослідження.

2. Рух ГДВ варіюється в залежності від шорсткості схилу, маси рухомого матеріалу, і може бути інтерпретований за допомогою обчислень геоморфометричних даних, теплових та рослинних властивостей. Найбільші показники руху (1,9–2,4 см на рік) відбувались у нижній частці схилу, де тонкий дрібноуламковий матеріал, найвищий вміст вологи і висока щільність дернового покриву, ймовірно, сприяє щорічному підвищенню швидкості плинущої соліфлюкційних процесів.

Отже, рух соліфлюкції потрібно оцінювати при високій просторовій роздільній здатності, яка може бути забезпечена фотограметрією SfM на основі знімків, отриманих за допомогою БПЛА.<sup>12</sup>

---

1Eichel J, Corenblit D, Dikau R. Conditions for feedbacks between geomorphic and vegetation dynamics on lateral moraine slopes: a biogeomorphic feedback window. *Earth Surf Process Landf.* 2016

2Draebing D, Eichel J. Divergence, convergence and path-dependency of paraglacial adjustment of Alpine lateral moraine slopes. *Land*

*Degradation Dev.* 2018;29(6):1979-1990. <https://doi.org/10.1002/ldr.2983>

3Smith MW, Carrivick JL, Quincey DJ. Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progr Phys Geogr Earth Environ.* 2016

4Rapp A. Recent development of mountain slopes in Kärkevagge and surroundings, northern Scandinavia. *Geogr Ann.* 1960

5Eichel J, Draebing D, Klingbeil L, et al. Solifluction meets vegetation: the role of biogeomorphic feedbacks for turf-banked solifluction lobe development. *Earth Surf Process Landf.* 2017;

6Harris C, Smith JS, Davies MCR, Rea B. An investigation of periglacial slope stability in relation to soil properties based on physical modelling in the geotechnical centrifuge. *Geomorphology.* 2008;

7Vivero S, Lambiel C. Monitoring the crisis of a rock glacier with repeated UAV surveys. *Geograph Helv.* 2019

8 Kääb A, Girod L, Berthling I. Surface kinematics of periglacial sorted circles using structure-from-motion technology. *The Cryosphere.*

2014

## ВИСНОВКИ

Вивчення таких характеристик поверхні Землі для тих чи інших цілей є і завжди буде обов'язковою складовою господарської діяльності, науки, щоденного існування людини. Морфологія, й сучасна динаміка природних систем завжди змінюється непередбачувано, і потребує постійного контролю. Саме через це у дипломній роботі було гозгянуто велику кількість напрямків, де можуть використовуватися безпілотні літальні апарати. Адже на сучасному етапі розвитку технологій існує зручна можливість отримувати актуальну інформацію про ті чи інші характеристики геосфери дистанційно, значно скорочуючи фінансові витрати і людські ресурси.

Окрему увагу варто приділити технології SFM, що допомагає значно полегшити сприйняття картографічних даних за допомогою графічної імітації тривимірного зображення. Також варто відмітити ефективність програмного забезпечення, що здатне створювати ЦМР та ортофотоплани у автоматичному, або ж напівавтоматичному режимі. Таким чином повний цикл створення картографічних даних може проходити у автоматичному режимі за участі лиш одного кваліфікованого спеціаліста.

Також окремим плюсом картографування місцевості за допомогою безпілотних літальних апаратів є можливість безрешечно працювати у важкодоступних місцях як заболочені місцевості, гірські місцевості вище або неподалік снігової лінії, водні об'єкти... Робота у такій місцевості, за умови використання наземних методів зйомки потребує спеціальної підготовки кадрів, спеціальне обладнання і техніка, що через вартість соєї експлуатації роблять подібні дослідження неможливими.

---

9James MR, Robson S. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surf Process Landf.* 2014

10 Vivero S, Lambiel C. Monitoring the crisis of a rock glacier with repeated UAV surveys. *Geograph Helv.* 2019;

11Jaesche P, Huwe B, Stingl H, Veith H. Temporal variability of alpine solifluction: a modelling approach. *Geograph Helv.*

Таким чином, використання БПЛА для створення ортофотопланів або ЦМР виступає найдешевшим шляхом отримати високоякісні дані досліджуваної місцевості у максимально короткі термини. Повний цикл подібних робіт може виконувати один спеціаліст, що знов ж таки зводить витрати на подібні роботи до мінімуму й робить подібний метод унікальним і незамінним у час стрімкого розвитку технологій.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ЛІТЕРАТУРИ

- 1 *Bandini F., Bauer-Gottwein, P., & Garcia, M.* Hydraulics and drones: observations of water level, bathymetry and water surface velocity from Unmanned Aerial Vehicles. Kgs. Lyngby: Department of Environmental Engineering, Technical University of Denmark (DTU). 2017
- 2 *Filippo Bandini, Jose Antonio Reyna-Gutierrez, Peter Bauer-Gottwein.* Measuring water level in rivers and lakes from lightweight Unmanned Aerial Vehicles / Journal of hydrology Volume 548, May 2017
- 3 Скубиев С.И. Использование беспилотных летательных аппаратов для целей картографии / Тезисы X Юбилейной международной научно-технической конференции «От снимка к карте: цифровые фотограмметрические технологии». Гаета, Италия, 2010.
- 4 Михайлов А.П., Курков В.М. Повышение эффективности технологий создания цифровых топографических и кадастровых карт по материалам аэрофотосъемки // Сб. докладов международной научно-технической конференции, посвященной 225-летию МИИГАиК. — М.: МИИГАиК, 2004
- 5 F. Leberl, J. Thurgood<sup>2</sup>, The Promise of Softcopy Photogrammetry Revisited, ISPRS 2004, Istanbul
- 6
- 7 Li R., Ma R. and Di K. 2002. Digital Tide-Coordinated Shoreline. Marine Geodesy, 25
- 8 А.П.Михайлов, Эдгар Рубен Монтель Андраде. «Фотограмметрический метод мониторинга состояния морских и океанских побережий по материалам аэрофотосъемки», Известия ВУЗов «Геодезия и аэрофотосъем-ка», № 3, 2013 г.,
- 9 Дуда П.И., Волков В.В., Фурса А.И. Определение координат точек по крупномасштабным снимкам, получаемым малогабаритными летательными аппаратами.//Маркшейдерское дело и геодезия: Межвузовский сборник научных трудов./СПГТИ.- СПб, 1997
- 10 Simon Hennig, Wolfgang Koppe, Karlheinz Gutjahr, Roland Perko, and Hannes Raggam. Evaluation of radargrammetry dems based on terrasar-x staring spotlight imagery. In 35. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF), number 24, pages 1-8, Cologne, Germany, March 2015.
- 11 М.Н. Коева, В.П. Петрова, Д.В. Жечев. Геопрофи электронный журнал по геодезии картографии и навигации.
- 12 Михайлов А.П., Курков В.М. Повышение эффективности технологий создания цифровых топографических и кадастровых карт по материалам аэрофотосъемки // Сб. докладов международной научно-технической конференции, посвященной 225-летию МИИГАиК. — М.: МИИГАиК, 2004,

- 13 Arens, J.C.; Wright, C.W.; Sallenger, A.H.; Krabill, W.B., and Swift, R.N., 2002. Basis and methods of NASA airborne topographic mapper LIDAR surveys for coastal studies. *Journal of Coastal Research*, 18
- 14 Eckerstorfer M, Eriksen Ho, Rouyet L, Christiansen HH, Lauknes TR, Blikra LH. Comparison of geomorphological field mapping and 2D InSAR mapping of periglacial landscape activity at Nordnesfjellet, northern Norway. *Earth Surf Process Landf.* 2018
- 15 Barry, R.G., 2006. The status of research on glaciers and global glacier recession: a review. *Prog. Phys. Geogr*
- 16 Bhardwaj, A., Sam, L., Martín-Torres, F.J., Kumar, R., 2016. UAVs as remote sensing platform in glaciology: Present applications and future prospects. *Remote Sens. Environ.*
- 17 Dabski, M., Zmarz, A., Pabjanek, P., Korczak-Abshire, M.g., Karsznia, I., Chwedorzewska, K.J.,
- 18 2017. UAV-based detection and spatial analyses of periglacial landforms on Demay Point
- 19 (King George Island, South Shetland Islands, Antarctica). *Geomorphology*.
- 20 Gindraux, S., Boesch, R., Farinotti, D., 2017. Accuracy Assessment of Digital Surface Models from Unmanned Aerial Vehicles' Imagery on Glaciers. *Remote Sensing*, 9(2).
- 21 Käab A, Girod L, Berthling I. Surface kinematics of periglacial sorted
- 22 circles using structure-from-motion technology. *The Cryosphere*.
- 23 2014
- 24 Oerlemans, J., Giesen, R.H., Van den Broeke, M.R., 2009. Retreating alpine glaciers: increased melt
- 25 rates due to accumulation of dust (Vadret da Morteratsch, Switzerland). *Journal of Glaciology*
- 26 Pellicciotti, F., Brock, B., Strasser, U., Burlando, P., Funk, M., Corripio, J., 2005. An enhanced
- 27 temperature-index glacier melt model including the shortwave radiation balance:
- 28 development and testing for Haut Glacier d'Arolla, Switzerland. *Journal of Glaciology*
- 29 Di Mauro, B., Fava, F., Ferrero, L., Garzonio, R., Baccolo, G., Delmonte, B., Colombo, R., 2015.
- 30 Mineral dust impact on snow radiative properties in the European Alps combining ground,
- 31 UAV, and satellite observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(12)
- 32 James, M.R., Robson, S., d'Oleire-Oltmanns, S., Niethammer, U., 2017. Optimising UAV
- 33 topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity
- 34 and bundle adjustment. *Geomorphology*

- 35 Gao, J., Liu, Y., 2001. Applications of remote sensing, GIS and GPS in glaciology: a review. *Prog.Phys. Geogr.*, 25(4)
- 36 Lowe, D.G., 2004. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*, 60(2),
- 37 of Computer Vision, 60(2),
- 38 Agisoft Photoscan Professional. Available online: <http://www.agisoft.ru/> (accessed on 29 June 2017). Barnhart, T., Crosby, B., 2013. Comparing Two Methods of Surface Change Detection on an Evolving Thermokarst Using High-Temporal-Frequency Terrestrial Laser Scanning, Selawik River, Alaska. *Remote Sensing*, 5(6),
- 39 Eichel J, Corenblit D, Dikau R. Conditions for feedbacks between geomorphic and vegetation dynamics on lateral moraine slopes: a biogeomorphic feedback window. *Earth Surf Process Landf.* 2016
- 40 Draebing D, Eichel J. Divergence, convergence and path-dependency of paraglacial adjustment of Alpine lateral moraine slopes. *Land Degradation Dev.* 2018;29(6):1979-1990. <https://doi.org/10.1002/ldr.2983>
- 41 Smith MW, Carrivick JL, Quincey DJ. Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progr Phys Geogr Earth Environ.* 2016
- 42 Rapp A. Recent development of mountain slopes in Kärkevagge and surroundings, northern Scandinavia. *Geogr Ann.* 1960
- 43 Eichel J, Draebing D, Klingbeil L, et al. Solifluction meets vegetation: the role of biogeomorphic feedbacks for turf-banked solifluction lobe development. *Earth Surf Process Landf.* 2017;
- 44 Harris C, Smith JS, Davies MCR, Rea B. An investigation of periglacial slope stability in relation to soil properties based on physical modelling in the geotechnical centrifuge. *Geomorphology.* 2008;
- 45 Vivero S, Lambiel C. Monitoring the crisis of a rock glacier with repeated UAV surveys. *Geograph Helv.* 2019
- 46 Kääb A, Girod L, Berthling I. Surface kinematics of periglacial sorted circles using structure-from-motion technology. *The Cryosphere.* 2014
- 47 2014
- 48 James MR, Robson S. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surf Process Landf.* 2014
- 49 Vivero S, Lambiel C. Monitoring the crisis of a rock glacier with repeated UAV surveys. *Geograph Helv.* 2019;
- 50 Jaesche P, Huwe B, Stingl H, Veith H. Temporal variability of alpine solifluction: a modelling approach. *Geograph Helv.*
- 51 Krylenko, V.V. (2013). The use of GNIC LEICA GEOSYSTEMS equipment in scientific research. *Geoprofi. Moscow.*
- 52 Коновалова Т.И. Геосистемное картографирование. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2010
- 53 Коновалова Т.И. Геосистемное картографирование. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2010

- 56 Пахахинова З.З., Батоцыренов Э.А., Бешенцев А.Н. Картографическая регистрация базовых пространственных объектов для мониторинга природопользования
- 57 Батоцыренов Э.А., Цыдыпов Б.З., Алымбаева Ж.Б., Содномов Б.В., Гуржапов Б.О., Андреев С.Г., Аюржанаев А.А., Жарникова М.А., Саятина Д.О., Серкина Д.А., Гармаев Е.Ж. Опыт использования бес-пилотных летательных аппаратов в геоэкологических исследованиях // Актуальные вопросы в области землеустройства, кадастров и природообустройства: проблемы и перспективы развития: материалы меж-дународной научно-практической конференции, посвященной 20-летию кафедры землеустройства (13 мая 2016 г.).
- 58 Батоцыренов Э.А., Цыдыпов Б.З., Алымбаева Ж.Б., Содномов Б.В., Гуржапов Б.О., Андреев С.Г., Аюржанаев А.А., Жарникова М.А., Саятина Д.О., Серкина Д.А., Гармаев Е.Ж. Опыт использования беспилотных летательных аппаратов в геоэкологических исследованиях // Актуальные вопросы в области землеустройства, кадастров и природообустройства: проблемы и перспективы развития: материалы меж-дународной научно-практической конференции, посвященной 20-летию кафедры землеустройства (13 мая 2016 г.).
- 59 ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ Материалы Всероссийской научно-практической конференции (Иркутск, 22–23 мая 2018 г.). – Иркутск: Издательство Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2018.
- 60 *Alfredsen Knut, Haas Christian, Tuhtan Jeffrey A., Zinke1 Peggy.* Brief / Communication: Mapping river ice using drones and structure from motion. The Cryosphere journal. Discussion started: 9 October 2017
- 61 *Банищиков А.А., Банищикова Л.С.* Результаты оценки параметров затора льда с помощью беспилот-ного летательного аппарата на участке р. Мста у д. Малый Порог. Труды V Всероссийской конференции «Ледовые и термические процессы на водных объектах России». – М: Изд-во РГАУ-МСХА, 2016

## ДОДАТКИ

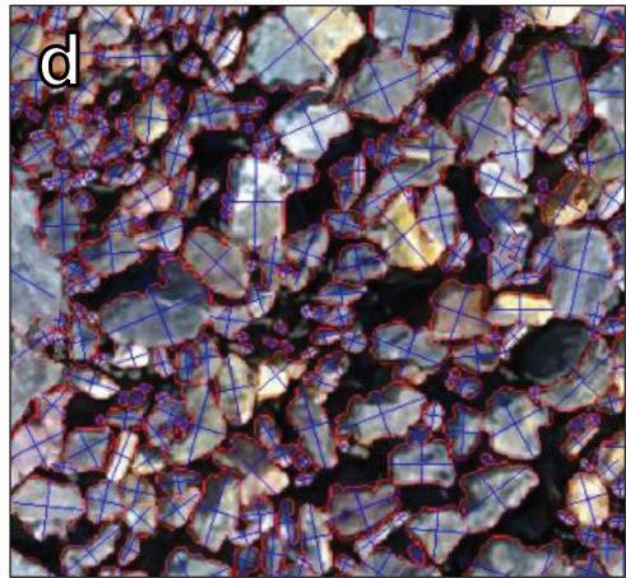
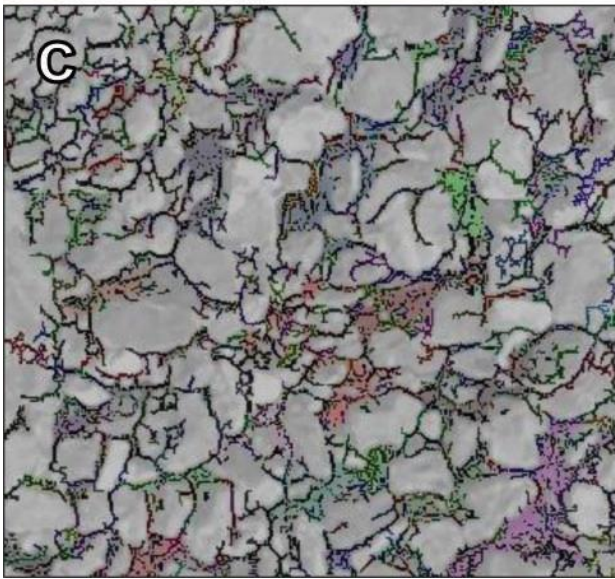
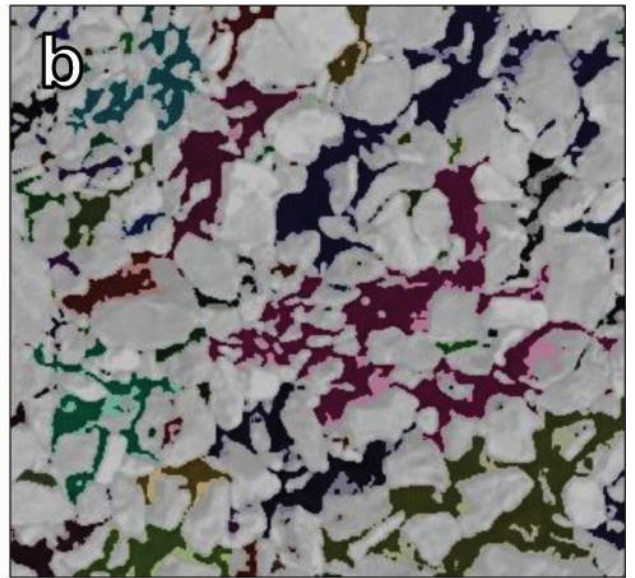


Рис.1

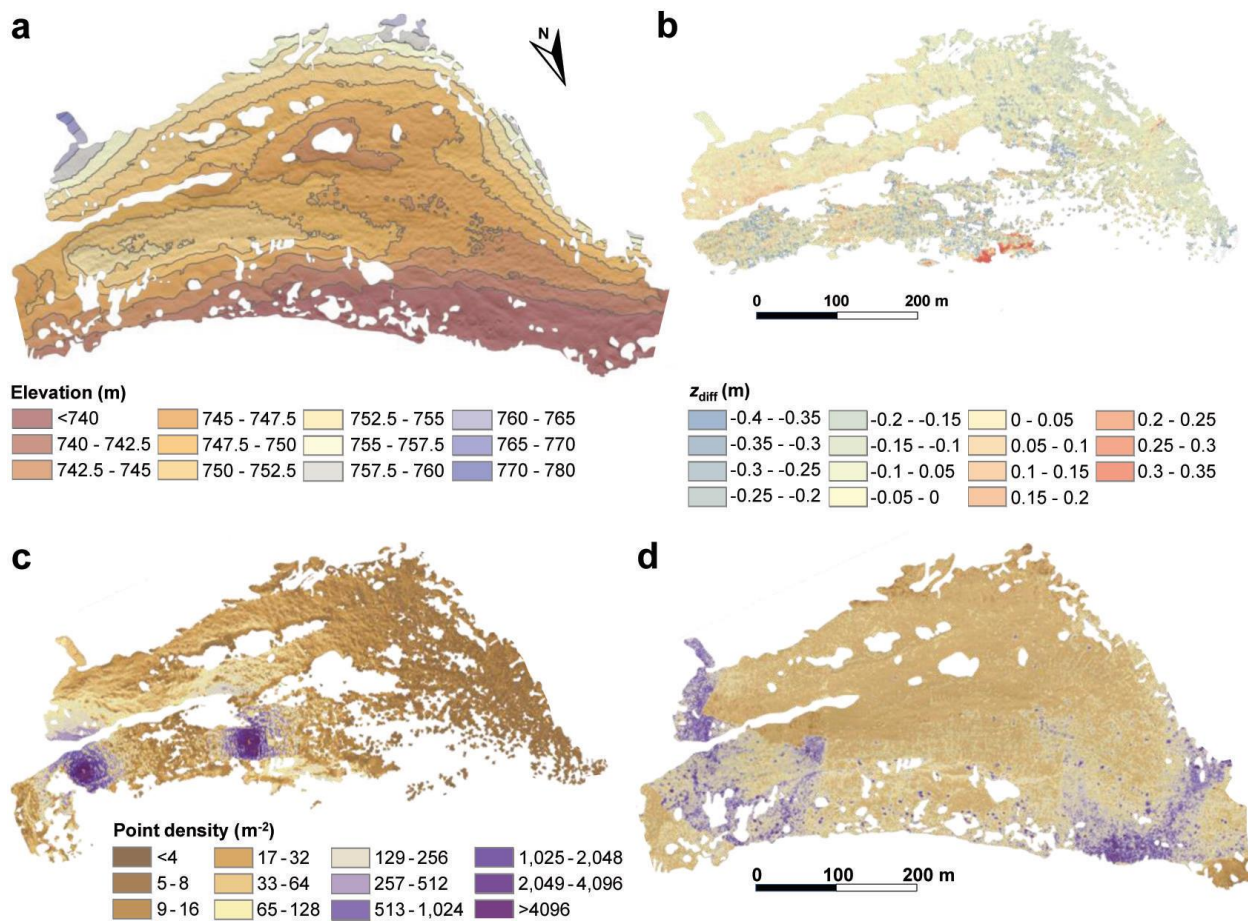


Рис.2

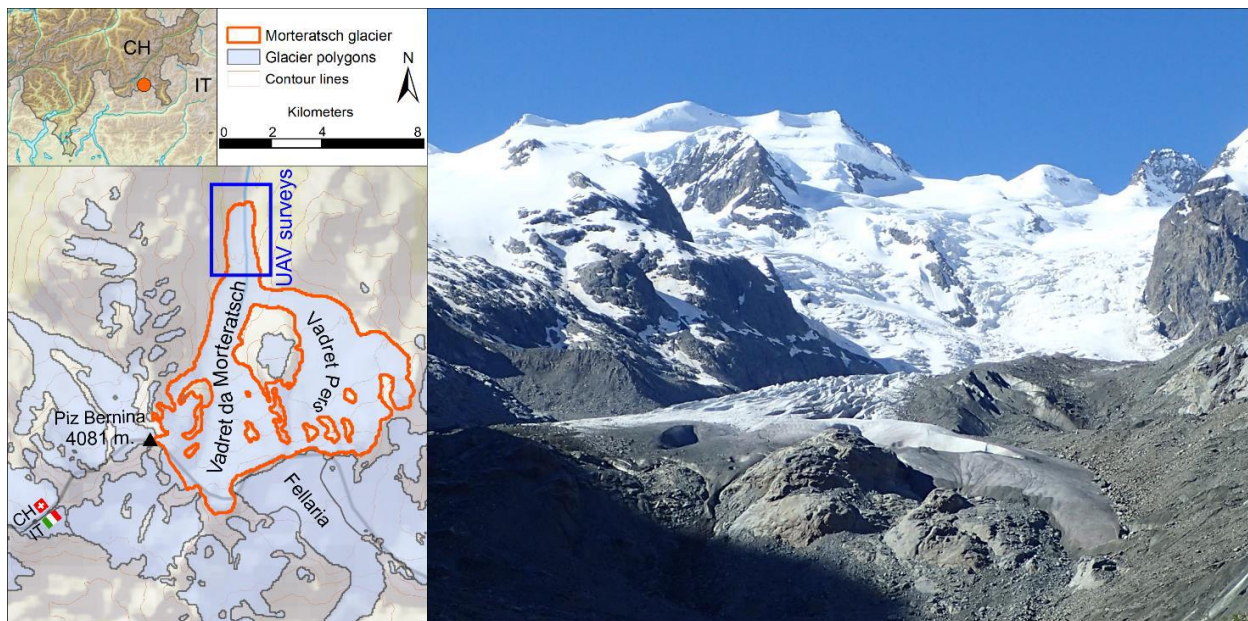


Рис.3

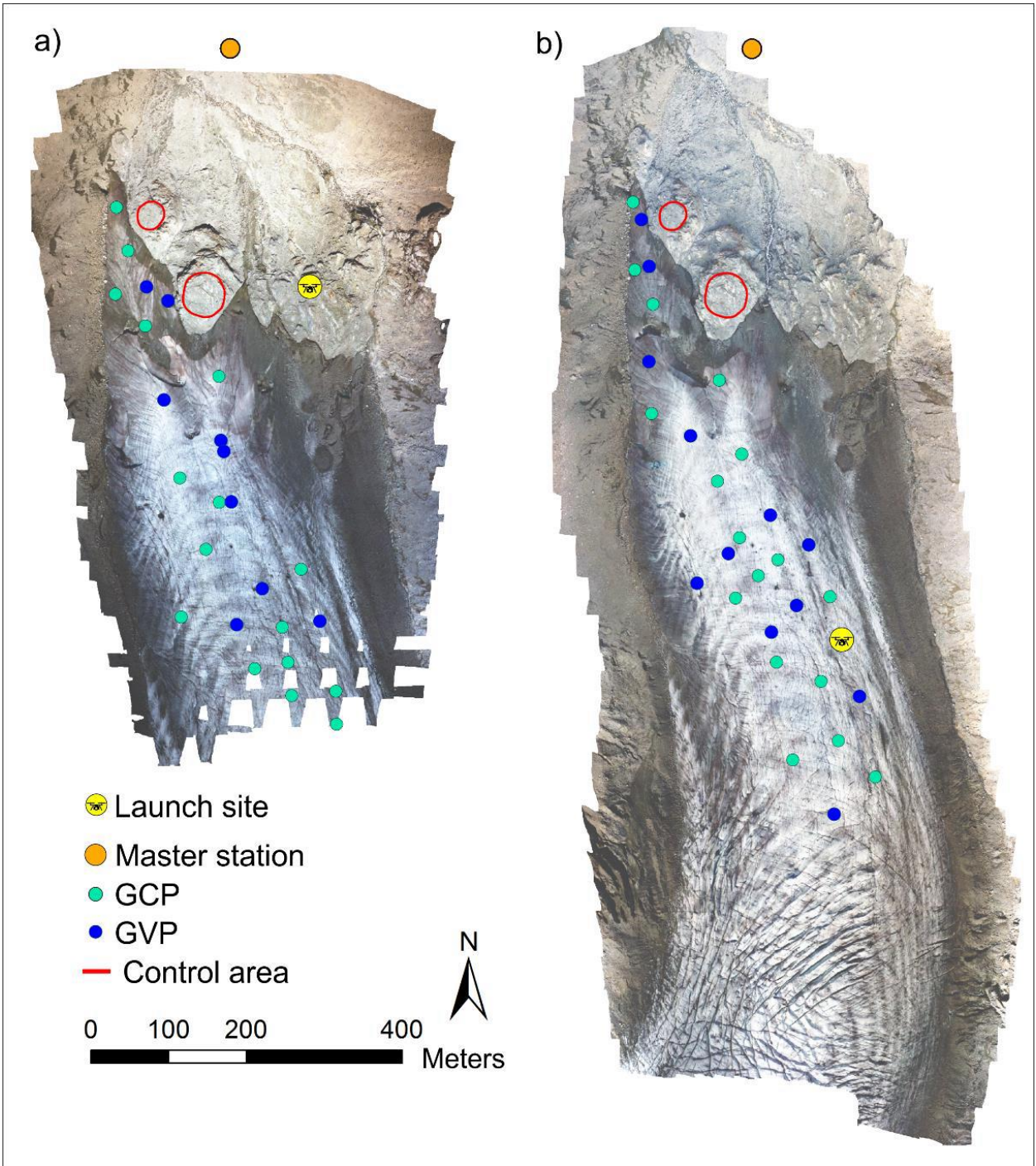


Рис.4

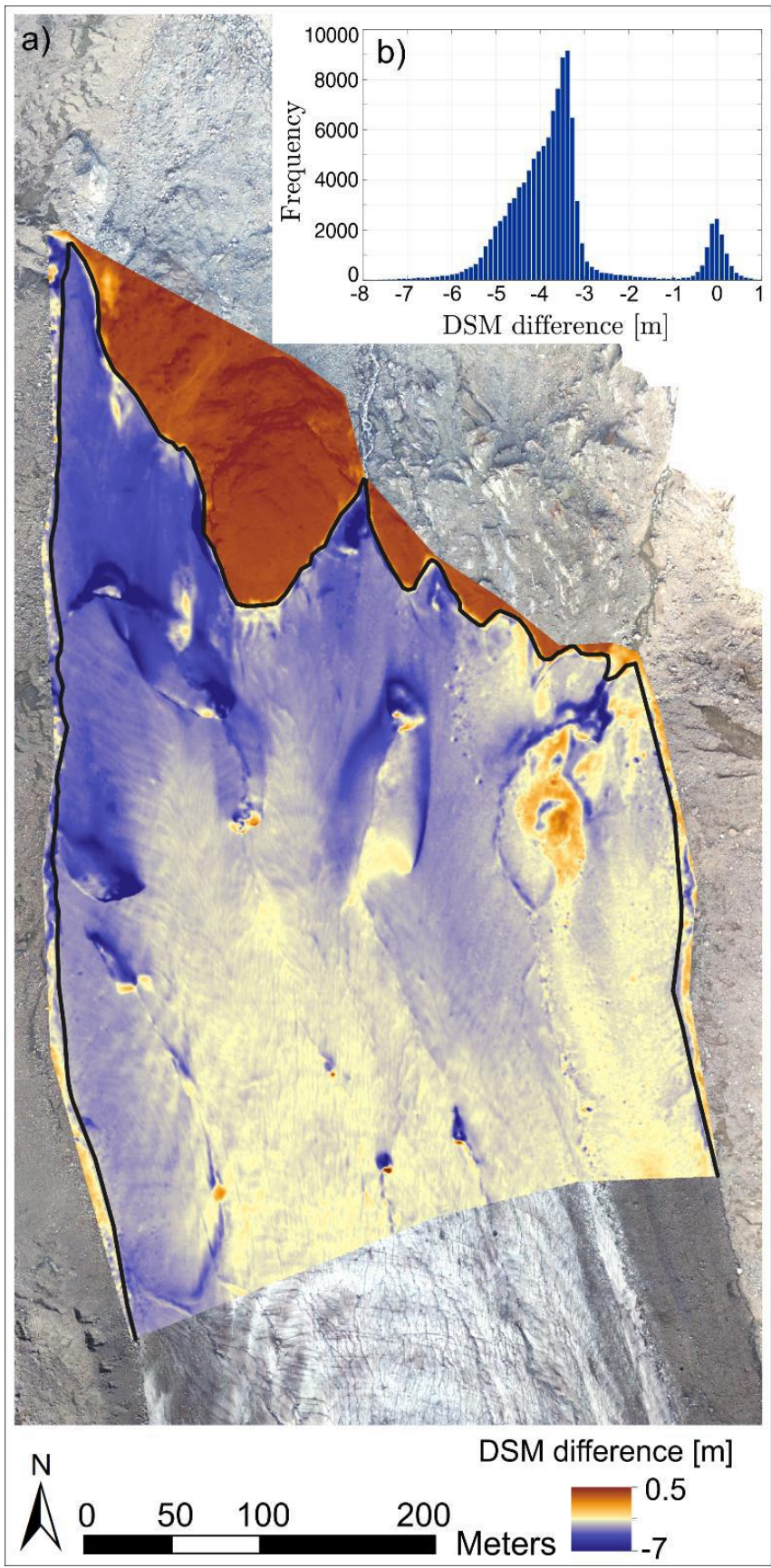


Рис.5

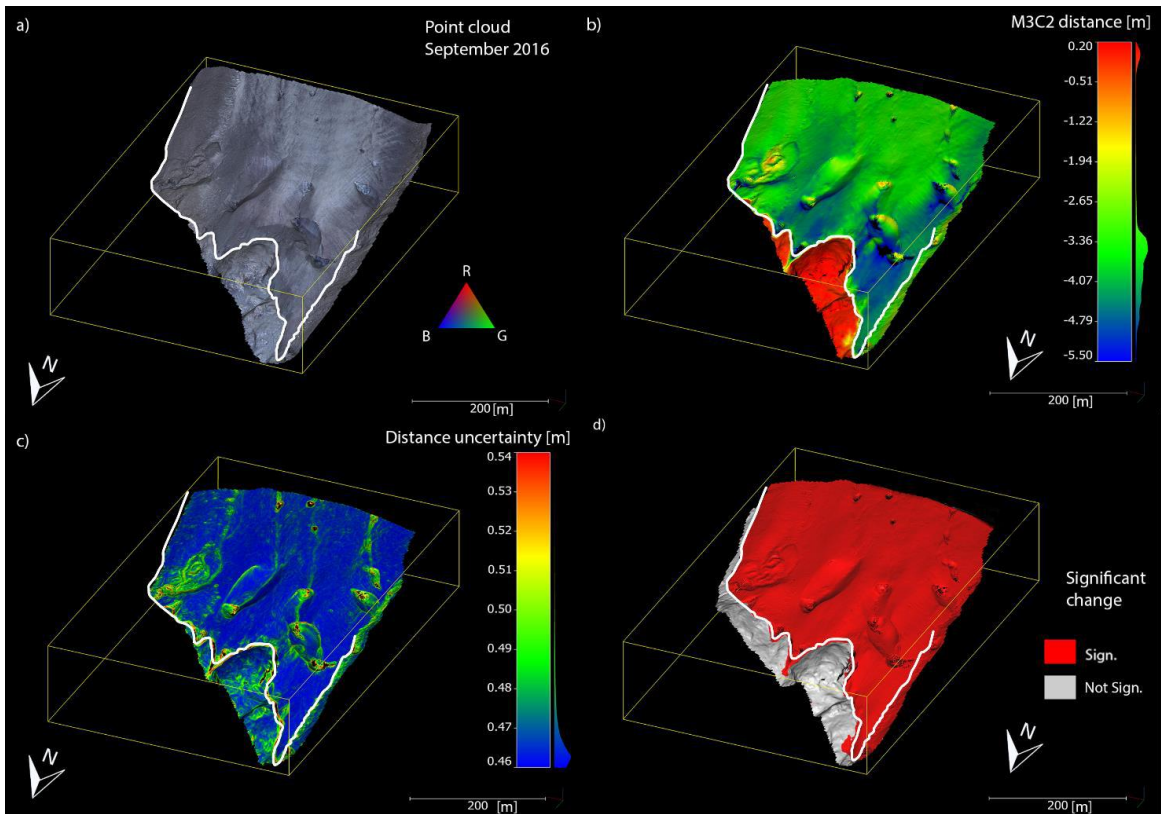


Рис.6

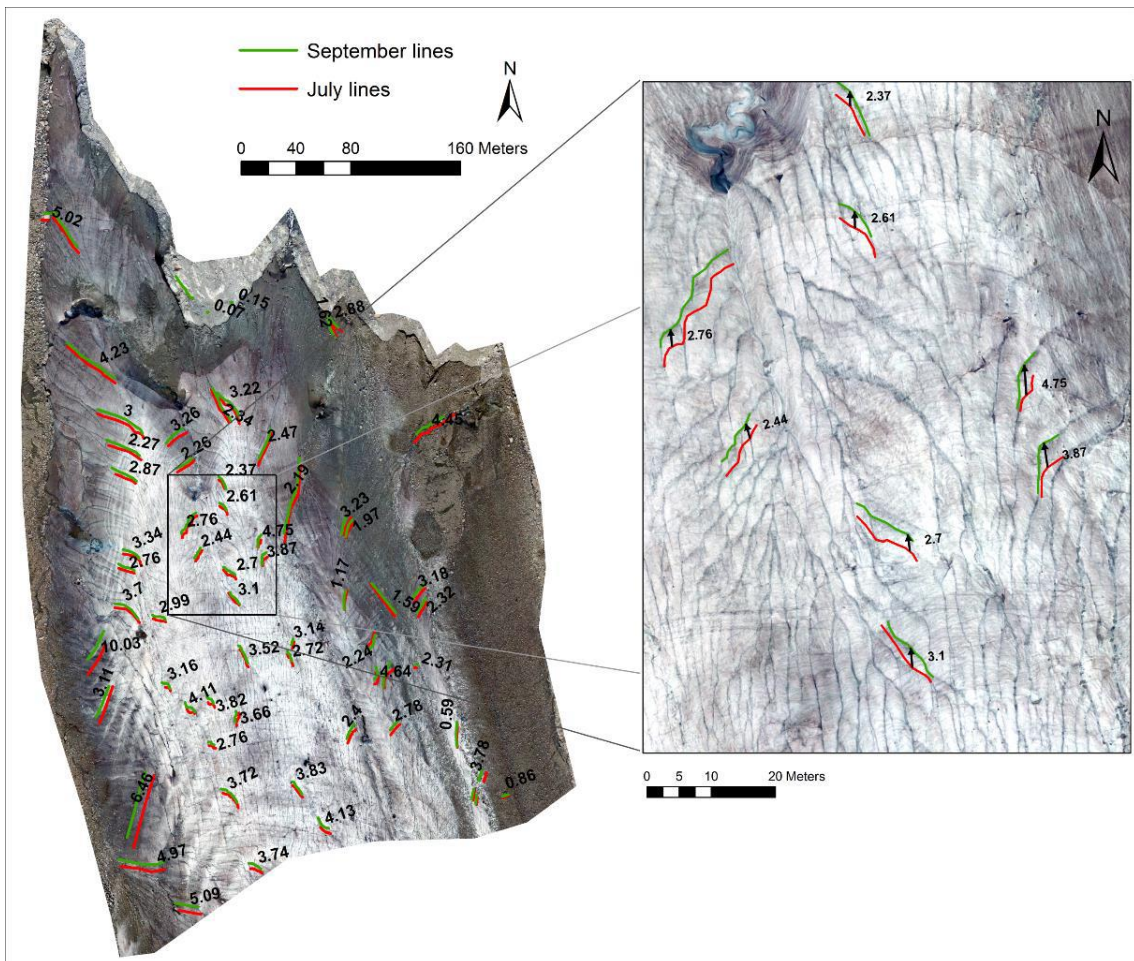


Рис.7

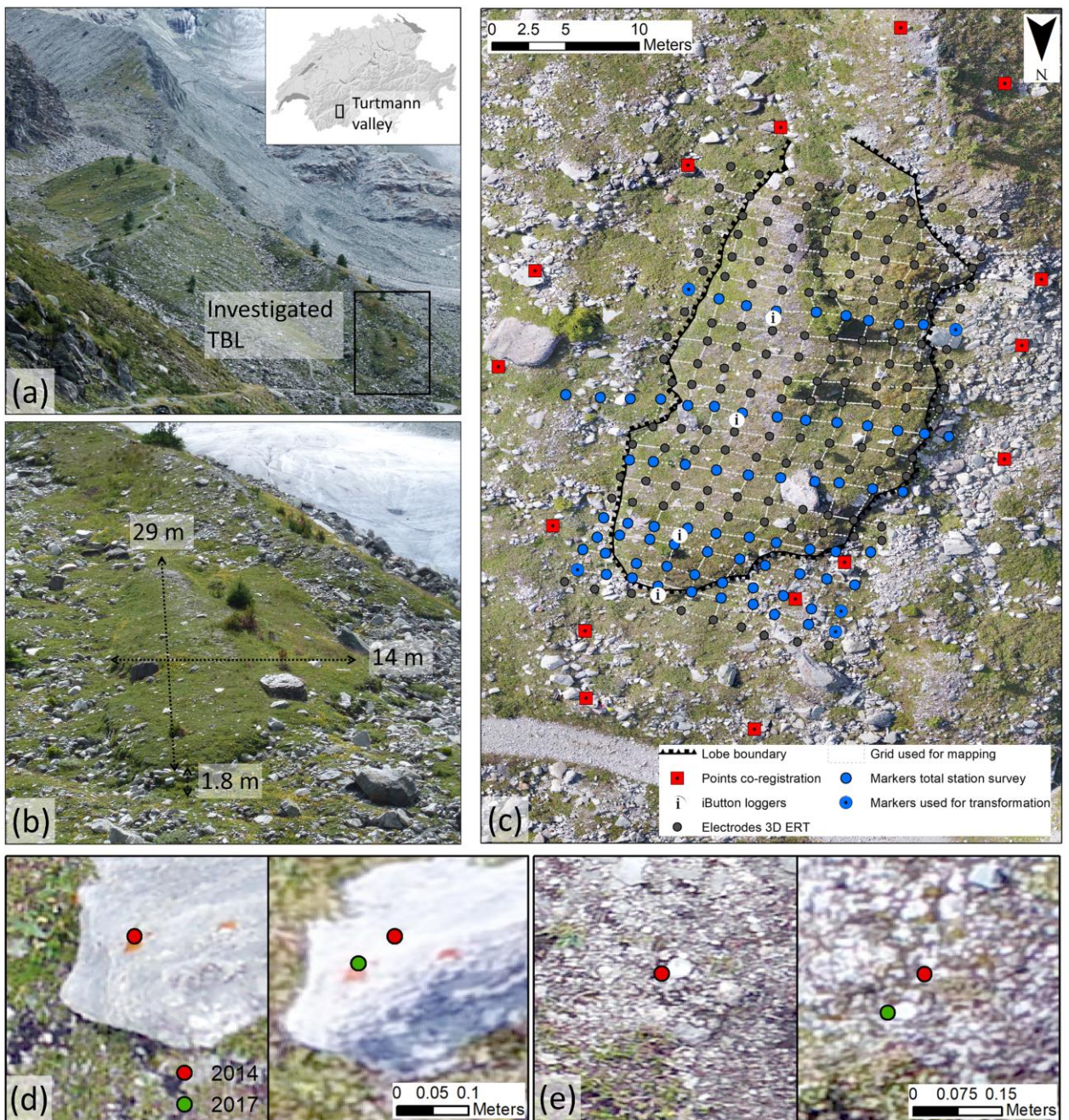


Рис. 8

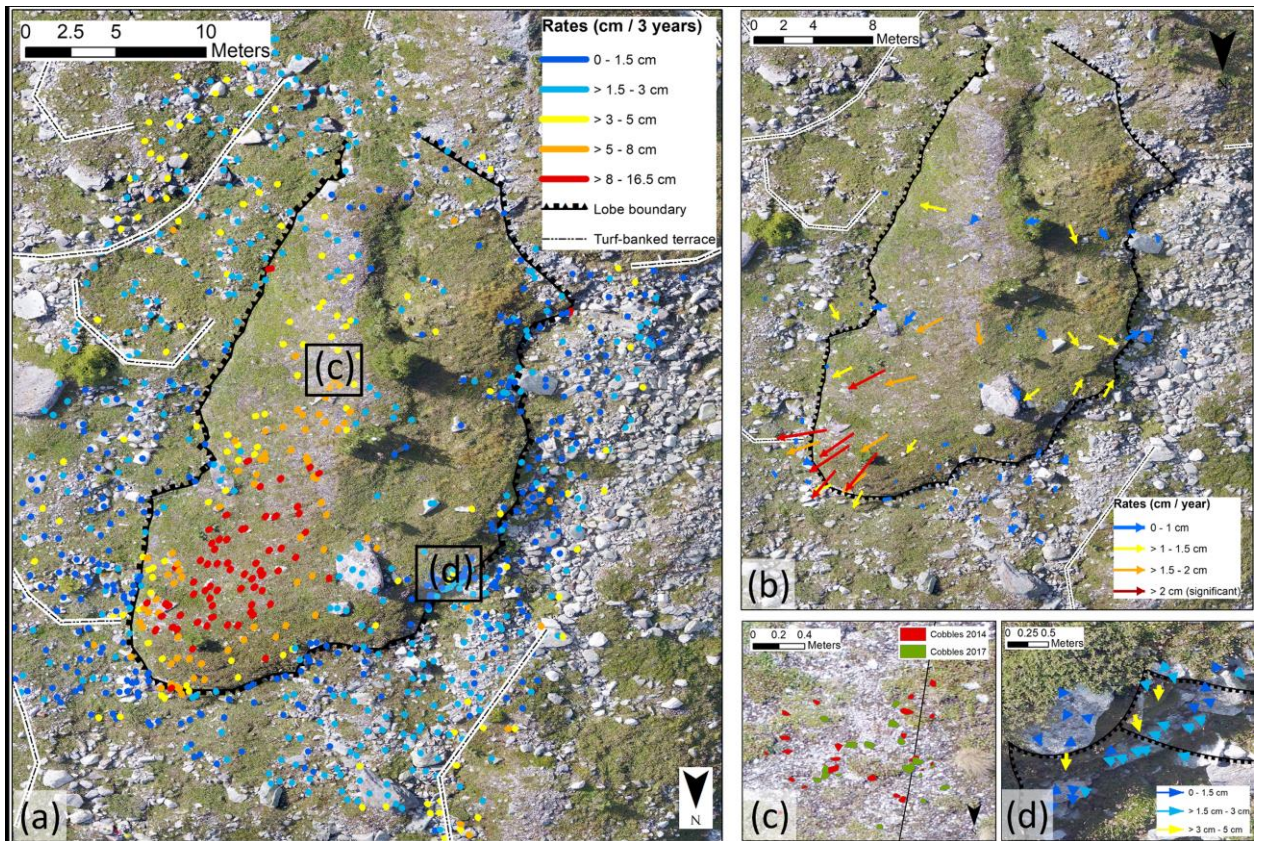


Рис. 9

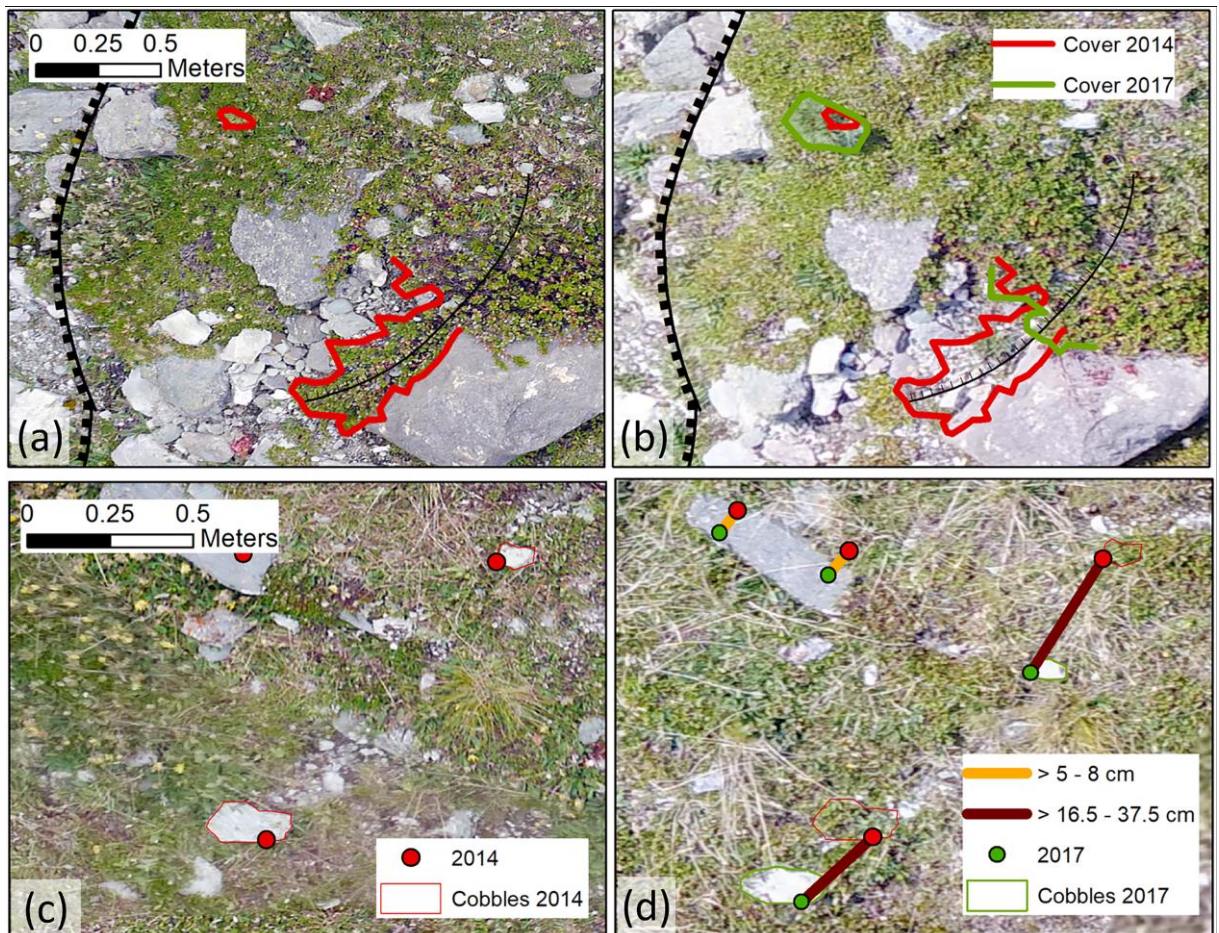


Рис. 10

