

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Група ГЗ-22-1

Марія Тимчишин

2026

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва «ІФНТУНГ-ДонНАБА»
Кафедра геодезії та землеустрою

Тимчишин Марія Петрівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

УДК 528.16
(індекс)

БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА

Створення карти швидкостей льодового потоку за даними супутника
Sentinel-1 на прикладі льодовиків півострова Київ, Західна

Антарктика

(назва роботи)

193 Геодезія та землеустрій

(назва освітньої програми)

193 Геодезія та землеустрій

(шифр і назва спеціальності)

**Робота містить результати власних досліджень, використання ідей, результатів і
текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело:**

Здобувач освітнього ступеня

М.П. Тимчишин

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник

Кухтар Денис Васильович, к.т.н., доцент

(підпис, прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання керівника)

Допущено до захисту

Завідувач кафедри

геодезії та землеустрою

М.М. Приходько

(посада)

(підпис) (дата)

(ініціали та прізвище)

Івано-Франківськ – 2026

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
Інститут архітектури та будівництва «ІФНТУНГ-ДонНАБА»
Кафедра геодезії та землеустрою
Освітньо-кваліфікаційний рівень бакалавр
Спеціальність 193 Геодезія та землеустрій
Освітньо-професійна програма Геодезія та землеустрій

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ГКЗ
Приходько М. М.

«__» _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ
НА БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ СТУДЕНТЦІ

Тимчишин Марії Петрівні

1. Тема роботи:

«Створення карти швидкостей льодового потоку за даними супутника Sentinel-1 на прикладі льодовиків півострова Київ, Західна Антарктика»

Керівник роботи доц. Кухтар Д.В.

Наказ ректора від «13» травня _____ 2026 року № 358.

2. Термін подання студентом роботи: 16 червня 2026 року.

3. Вихідні дані до роботи: радіолокаційні знімки.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

Вступ

1. Фізико-географічна характеристика району дослідження.

2. Методика та технології супутникового моніторингу льодовикових потоків.

3. Аналіз результатів та перспективи їх використання.

Висновки

Список використаних джерел

Бібліографічна довідка

5. Перелік графічного матеріалу:

1. Карта швидкостей льодового потоку на прикладі півострова Київ, Західна Антарктика.

7. Дата видачі завдання: «01» березня 2026 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів бакалаврської роботи	Термін виконання
1	Отримання завдання на виконання бакалаврської роботи. Пошук і опрацювання літератури.	01.03.26 15.03.26
2	Складання попереднього плану та змісту бакалаврської роботи.	19.03.26 25.03.26
3	Підбір та завантаження супутникових знімків.	26.03.26 12.04.26
4	Опрацювання радіолокаційних даних.	13.04.26 29.04.26
5	Фізико-географічний опис району робіт.	30.04.26 15.05.26
6	Формування пояснювальної записки.	16.05.26 18.05.26
7	Оформлення бакалаврської роботи, складання висновків.	19.05.26 16.06.26

Студент

(підпис)

Тимчишин М. П.

(розшифровка підпису)

Керівник

(підпис)

Кухтар Д. В.

(розшифровка підпису)

АННОТАЦІЯ

Визначення швидкості руху льоду є важливою складовою моніторингу кріосфери, що дозволяє досліджувати динаміку льодовиків під впливом глобальних кліматичних змін. Сьогодні супутникові радіолокаційні дані є найефективнішим інструментом для регулярного спостереження за льодовиковим покривом на великих і важкодоступних територіях Антарктики.

В програмному комплексі SNAP успішно реалізовано метод відстеження зміщення амплітудних об'єктів (SAR Offset Tracking) та відпрацьовано технологічну схему препроцесингу й спільної реєстрації пари радіолокаційних знімків супутника Sentinel-1. За результатами їх обробки отримано нові значення швидкостей руху вивідних льодовиків, які доповнюють існуючий часовий ряд даних довготривалого моніторингу півострова Київ для дослідження впливу глобального потепління на кріосферу регіону. Також створено актуальну цифрову карту динаміки льодового потоку. Максимальне значення швидкості, зафіксоване в пригирловій частині льодовика Труз становить 3,56 м/добу.

Розроблена технологічна схема та створена цифрова карта можуть бути використані Національним антарктичним науковим центром України (НАНЦ) для екологічного моніторингу Західної Антарктики. Результати дослідження мають практичну цінність для подальших наукових праць дослідників, викладачів та студентів, які займаються вивченням гляціодинаміки та кліматичних змін у цьому полярному регіоні.

Ключові слова: дистанційне зондування, метод відстеження зміщень, радар з синтезованою апертурою, УАС «Академік Вернадський», SNAP.

ABSTRACT

Determining the speed of ice movement is an important component of cryosphere monitoring, which allows studying the dynamics of glaciers under the influence of global climate change. Today, satellite radar data is the most effective tool for regular monitoring of ice cover in large and hard-to-reach areas of Antarctica.

The SNAP software package successfully implemented the method of tracking the displacement of amplitude objects (SAR Offset Tracking) and worked out the technological scheme of preprocessing and joint registration of a pair of radar images of the Sentinel-1 satellite. Based on the results of their processing, new values of the speeds of the outlet glaciers were obtained, which complement the existing time series of data of long-term monitoring of the Kyiv Peninsula for studying the impact of global warming on the cryosphere of the region. An up-to-date digital map of ice flow dynamics was also created. The maximum speed value recorded in the mouth part of the Truz glacier is 3.56 m/day.

The developed technological scheme and the created digital map can be used by the National Antarctic Science Center of Ukraine (NASC) for environmental monitoring of West Antarctica. The results of the study have practical value for further scientific work of researchers, teachers and students who are engaged in the study of glaciodynamics and climate change in this polar region.

Keywords: remote sensing, offset tracking method, synthetic aperture radar, UAS "Akademik Vernadsky", SNAP.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1 ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНУ ДОСЛІДЖЕННЯ	10
1.1. Актуальність дослідження динаміки льодовиків та сучасні методи її моніторингу.....	10
1.2. Характеристика півострова Київ та льодовиків на ньому	11
1.3. Роль української антарктичної станції у вивченні Західної Антарктики	17
Висновки до розділу 1	18
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ТА ТЕХНОЛОГІЇ СУПУТНИКОВОГО МОНІТОРИНГУ ЛЬОДОВИКОВИХ ПОТОКІВ.....	20
2.1. Радіолокаційні методи дистанційного зондування Землі та інструменти обробки даних.....	20
2.2. Метод відстеження зміщення (Offset Tracking).....	25
2.3. Алгоритм створення карти швидкостей льодового потоку в SNAP... ..	26
Висновки до розділу 2	32
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ПРАКТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ.....	35
3.1. Аналіз отриманих результатів	35
3.2. Перспективи практичного використання даних	39
Висновки до розділу 3	41
ВИСНОВКИ	43
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46
БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА.....	48

ВСТУП

Актуальність теми дослідження.

Сучасні глобальні зміни клімату призводять до прискореної втрати маси гляціальних систем у полярних регіонах світу, що виступає одним із ключових чинників підвищення рівня Світового океану. Льодовикові щити та вивідні льодовики характеризуються надзвичайно високою чутливістю до коливань температури повітря й океанічних процесів, відіграючи роль прямих індикаторів кліматичних трансформацій. Особливої уваги міжнародної наукової спільноти сьогодні потребує Західна Антарктика, зокрема Антарктичний півострів, де фіксуються найбільш інтенсивні процеси деградації кріосфери та нестабільна динаміка льодового покриву.

Швидкість льодового потоку – це ключовий параметр, який відображає динамічний стан льодовика, його баланс маси та характер реакції на зовнішні кліматичні тригери. Виконання регулярних гляціологічних вимірювань традиційними наземними методами (зокрема за допомогою ГНСС-приймачів) в умовах Антарктики є вкрай складним, а часто й неможливим через суворий полярний клімат, високу щільність тріщин, логістичні обмеження та значні фінансові витрати.

У таких умовах альтернативи космічному моніторингу практично немає. Використання сучасних методів дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), зокрема космічної радіолокації, дозволяє здійснювати всепогодний, регулярний та високоточний моніторинг гляціодинаміки на великих і важкодоступних територіях.

З огляду на це, тема кваліфікаційної роботи «Створення карти швидкостей льодового потоку за даними супутника Sentinel-1 на прикладі льодовиків півострова Київ, Західна Антарктика» є актуальною та важливою.

Мета роботи: розробка та реалізація технологічної схеми обробки супутникових радіолокаційних даних Sentinel-1 методом відстеження зміщення (SAR Offset Tracking) для створення цифрової карти швидкостей руху та аналізу

просторово-часової динаміки льодових потоків півострова Київ (Західна Антарктика).

Для досягнення поставленої мети дослідження необхідно вирішити такі **завдання**:

1. Дослідити фізико-географічні особливості району дослідження.
2. Проаналізувати сучасний стан і технічні можливості методів дистанційного зондування Землі (зокрема космічної радіолокації) для моніторингу динаміки руху полярних льодовиків.
3. Обґрунтувати вибір радарних даних місії Sentinel-1 та відпрацювати технологічну схему їхнього препроцесингу й спільної реєстрації у програмному комплексі SNAP.
4. Реалізувати алгоритм відстеження зміщення (SAR Offset Tracking) для розрахунку векторів та абсолютних значень швидкостей руху ключових вивідних льодовиків досліджуваного регіону.
5. Створити карту швидкостей льодового потоку досліджуваних льодовиків;
6. Виконати аналіз отриманих результатів.

Об'єктом дослідження є просторово-часова динаміка та кінематичні зміни (особливості руху) льодового покриву півострова Київ у Західній Антарктиці.

Предметом дослідження є технологія створення цифрових карт швидкостей руху льодових потоків методом SAR Offset Tracking за даними супутника Sentinel-1, а також просторово-часові закономірності й тенденції розподілу цих швидкостей у межах півострова Київ.

Методика дослідження. Інформаційною основою для аналізу просторово-часової динаміки льодового покриву півострова Київ слугували супутникові радіолокаційні дані місії Sentinel-1, отримані з відкритого репозиторію Copernicus Data Space Ecosystem. Цифрову обробку та геоінформаційне моделювання радарних зображень виконано у спеціалізованому програмному комплексі SNAP (Sentinel Application Platform). Технологічний алгоритм передбачав препроцесинг радарних даних, корекцію орбіт та процедуру їхньої

спільної реєстрації із залученням допоміжної цифрової моделі рельєфу (модуль DEM-Assisted Coregistration). Визначення кінематичних параметрів льодових потоків реалізовано за допомогою інструменту відстеження зміщення ознак (модуль Offset Tracking Operation).

Принцип методу offset tracking полягає у визначенні горизонтальних переміщень досліджуваної території, які відбулися між двома зніманнями. Для фіксації швидких переміщень льодових мас, часовий інтервал між зніманнями повинен бути найкоротшим. Супутникова місія Sentinel-1 у повній мірі забезпечує дану умову з інтервалом між зніманнями 6-12 днів.

Шляхом інтерполяції між мережею контрольних точок, формується суцільна карта швидкостей льодовика.

Наукова новизна дослідження полягає в тому, що просторово-часовий стан та кінематичні характеристики групи льодовиків півострова Київ вперше зафіксовано на конкретні календарні дати – 22 лютого та 6 березня 2026 року, що дозволило детально проаналізувати динаміку руху льоду за 12-ти денний інтервал.

Практичне значення отриманих результатів. Створена цифрова карта та відпрацьована технологічна схема обробки радарних даних можуть бути використані Національним антарктичним науковим центром України (НАНЦ) для екологічного моніторингу Західної Антарктики. Результати дослідження мають практичну цінність для впровадження у навчальний процес університетів за напрямом «Геодезія та землеустрій».

Крім того, матеріали роботи можуть слугувати основою для подальших наукових праць дослідників, викладачів та студентів, які займаються вивченням гляціодинаміки та кліматичних змін у цьому полярному регіоні.

РОЗДІЛ 1 ФІЗИКО-ГЕОГРАФІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНУ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Актуальність дослідження динаміки льодовиків та сучасні методи її моніторингу

Льодовики є важливими індикаторами кліматичних змін, оскільки швидко реагують на коливання температури повітря, режиму опадів та океанографічних умов [1]. Протягом останніх десятиліть у багатьох регіонах світу спостерігається прискорене скорочення їх площі, зменшення товщини та зміна швидкостей руху [4]. Особливу увагу науковців привертає льодовий покрив Антарктиди, який містить значну частину запасів прісної води Землі та суттєво впливає на рівень Світового океану.

Дослідження динаміки льодовиків дозволяє оцінити сучасний стан льодовикового покриву, виявити тенденції його змін та прогнозувати можливі наслідки глобального потепління. Одним із ключових параметрів, що характеризує динаміку льодовика, є швидкість руху льодового потоку. Аналіз просторового розподілу швидкостей дає змогу визначити зони прискорення або уповільнення руху льоду, виявити нестабільні ділянки та оцінити масообмін льодовикової системи.

Традиційні польові методи вимірювання швидкостей руху льодовиків забезпечують високу точність результатів, однак є трудомісткими, дорогими та складними для реалізації в умовах низьких температур, сильних вітрів та віддаленості антарктичних регіонів. У зв'язку з цим особливого значення набули методи дистанційного зондування Землі, які дозволяють отримувати регулярну інформацію про великі території незалежно від їхньої доступності [2].

Серед сучасних супутникових методів моніторингу льодовиків широко використовуються:

- оптична супутникова зйомка;
- радіолокаційна інтерферометрія (InSAR);

- метод відстеження зміщень (offset tracking);
- лазерна та радарна альтиметрія;
- аналіз часових рядів супутникових спостережень.

Особливу роль у дослідженні динаміки льодовиків відіграють дані супутників Sentinel-1, які здійснюють радіолокаційну зйомку поверхні Землі в будь-який час доби та за будь-яких погодних умов. Завдяки високій частоті повторних спостережень і значному просторовому охопленню ці дані є ефективним інструментом для визначення швидкостей льодового потоку.

Результатом обробки даних Sentinel-1 є карти швидкостей руху льоду, які містять інформацію про напрямок і величину переміщення льодовикових мас. Такі карти дозволяють:

- оцінювати інтенсивність руху льодовиків;
- виявляти зміни льодовикової динаміки в часі;
- досліджувати вплив кліматичних факторів на льодовиковий покрив;
- визначати потенційно нестабільні ділянки льодовиків;
- аналізувати внесок льодовиків у підвищення рівня Світового океану;
- створювати прогностичні моделі розвитку льодовикових систем.

1.2. Характеристика півострова Київ та льодовиків на ньому

Півострів Київ розташований у північно-західній частині Антарктичного півострова (англ. Antartic Peninsula) (рис. 1.1) та належить до регіону Західної Антарктики, який характеризується високою динамічністю льодовикових процесів.



Рис. 1.1. Антарктичний півострів

Півострів Київ (англ. Kyiv Peninsula) – півострів, який виступає на 35 км у північно-західному напрямку від західної сторони Землі Грея (Graham land), майже повністю покритий льодом та має овальну форму. Названий Болгарською експедицією на честь столиці України, розташований поблизу української антарктичної станції «Академік Вернадський» (рис. 1.2).

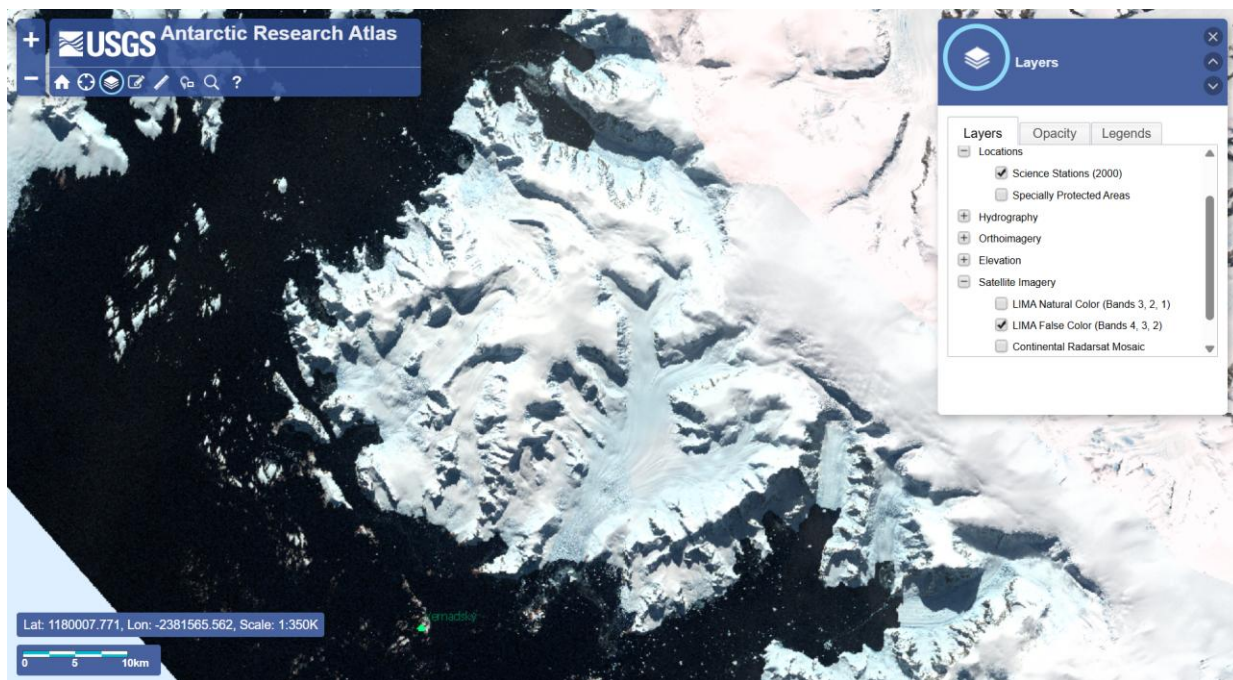


Рис. 1.2. Півострів Київ та українська антарктична станція «Академік Вернадський» [5]

Даний регіон цікавий для дослідження з двох вагомих причин:

1. Льодовики півострова Київ є чутливими індикаторами кліматичних змін, оскільки швидко реагують на коливання температури повітря та інші зміни навколишнього середовища. Це дає змогу використовувати їх як природні маркери сучасних кліматичних процесів.
2. Безпосередня близькість до української антарктичної станції «Академік Вернадський». На станції здійснюються регулярні метеорологічні спостереження, зокрема вимірювання температури повітря кожні три години. На відміну від даних дистанційного зондування Землі та результатів кліматичного моделювання, які мають опосередкований характер, ці спостереження є безпосередніми та високонадійними. Їх використання

дозволяє встановлювати кореляційні зв'язки між змінами температурного режиму та динамікою льодових мас, а також підвищує достовірність інтерпретації результатів супутникового моніторингу.

На північному сході півострів Київ омивається водами Фландрійської затоки, а на південному заході – затокою Бісочі. Канал Лемера та протока Пенола відділяють його від архіпелагу Вільгельма. Крайньою точкою півострова є мис Ренар. На південний захід від нього розташована Земля Грея, тоді як на північний схід простягається Узбережжя Данко. На західному узбережжі півострова знаходяться найвищі вершини – гори Демарія (635 м) і Транчант (285 м).

Територія дослідження представлена складною системою льодовикових потоків, що формують вихідні та прибережні льодовики, які безпосередньо впливають на масообмін між внутрішніми частинами льодовикового покриву та океаном.

Практично все узбережжя півострова Київ зайняте виходами великих льодовиків, з льодовиковими жолобами, розділеними краями скель, та кристалічними породами, які часто пронизують лід до поверхні у вигляді окремих вершин та хребтів. Центральна частина півострова лежить під льодовиковим щитом, який стоншується до узбережжя. Льодовики гніздяться в широких долинах, круто відступаючи від льодовикового щита плато та розходячись попереду до самого берега. Вони несуть сліди талої води, розколини та тріщини; саме в межах льодовиків очікуються найвищі швидкості зміщення.

Згідно з даними Композитного інформаційного довідника Антарктики [6] подана фізико-географічна характеристика та топоніми льодовиків півострова Київ:

- Труз. Найбільших льодовик на півострові. Впадає в північну частину затоки Коллінз. Ширина біля гирла становить 2,8 км, а довжина – 28 км. Особливістю цього льодовика є збільшення його площі більш ніж на 1 км² за останні 60 років. Подібна тенденція зареєстрована на Антарктичному

півострові лише в одного іншого льодовика, решта зменшилися. Спочатку французька експедиція 1908-1910 років дала йому назву Бертелот, за аналогією із сусідніми островами. Пізніше названий на честь Жюля де Труза (1857-1907), міністра внутрішніх справ та державної освіти Бельгії, який підписав Королівський указ від 4 грудня 1899 року про призначення Комісії Бельгії та допоміг забезпечити фінансування для публікації наукових результатів Бельгійської експедиції.

- Сомерс. Тече до льодовика Труз. Названий на честь Анрі Сомерса (нар. 1863), головного інженера на судні Belgica.
- Бельгія. Розташований у центральній частині півострова, є притокою льодовика Труз та простягається приблизно на 13 км. Названий на честь судна Belgica.
- Лі. Тече у затоку Жирар. Названий на честь пані Петри Лі Сірл з Управління заморських досліджень, яка зробила внесок у роботу з картографування району Антарктичного півострова.
- Талбот. Впадає у затоку Фландрія. Названий на честь Вільяма Г. Ф. Талбота (1800-77), англійського винахідника, 1839-41, першого практичного фотографічного процесу на папері, вдосконаленого та названого калотипією.
- Левер. Шириною 2,4 км біля гирла та щонайменше 10 км завдовжки, тече до верхів'я північного рукава затоки Бісочіа. Названий на честь британця Вільяма Х. Левера, 2-го віконт Леверхалма Західних островів, який зробив внесок у будівництво BGL, у 1954 році.
- Ньєпс. З'єднується з льодовиком Дагера та впадає в бухту Лозанна, затока Фландрія. Названий на честь Жозефа Н. Ньєпса (1765-1833), французького фізика, першої людини, яка створила постійний фотографічний запис, у період 1816-29 років, і який разом із французьким художником та фізиком Ж. Л. М. Дагером (льодовик Дагера) винайшов процес дагеротипії фотографії.

- Віггінс. Завдовжки 16 км, впадає у протоку Пенола. Названий на честь Вільяма Дугласа Клера Віггінса (1905-71), помічника директора Колоніальних (пізніше заморських) досліджень.
- Бассі. Тече від гори Пірі до верхів'я затоки Ваддінгтон. Названий на честь капітана групи Джона Бассі, офіцером Королівських повітряних сил Британської імперії (1895-1979).
- Лінд. Впадає у затоку Коллінз. Названий на честь хірурга Джеймса Лінда, (1716-94), шотландського засновника сучасної морської гігієни.

Льодовики даного регіону мають складну морфологічну структуру та різні кінематичні характеристики, що зумовлено впливом рельєфу, кліматичних умов та океанічних процесів.

Для стандартизації досліджень кожному льодовику в міжнародних каталогах присвоюється унікальний ідентифікаційний код. Найчастіше для цього використовуються бази даних Randolph Glacier Inventory (RGI) та Global Land Ice Measurements from Space (GLIMS) [7], що забезпечують однозначну ідентифікацію об'єктів, порівняння результатів різних досліджень та інтеграцію супутникових даних у глобальні бази спостережень за кріосферою.

Унікальний ідентифікаційний номер льодовиків генерується на основі довготи й широти льодовика. Ідентифікатор льодовика, присвоєний Всесвітньою службою моніторингу льодовиків. World Glacier Monitoring Service WGMS.

Формат ідентифікатора: **GxxxxxxEyyyyyS**, де

G – літера, означає льодовик (з англ. Glacier);

xxxxxx – східна довгота вибраної репрезентативної точки льодовика;

E – літера, що позначає східну довготу;

yyyyy – широта вибраної репрезентативної точки льодовика;

N/S – позначає північну «N» або південну «S» півкулю.

Таблиця 1.1. Морфометричні характеристики вивідних льодовиків півострова Київ

	Назва льодовика	Ідентифікатор	Площа, км ²	Товщина (м)	Середній нахил, °
№	1	2	3	4	5
1	Труз/Trooz	G296331E65278S	567.808	313.885	11.9844
2	Лі/Leay	G296191E65162S	241.859	240.870	13.3263
3	Талбот/Talbot	G296771E65286S	215.545	226.188	13.8452
4	Левер/Lever	G296513E65477S	177.871	253.060	13.0056
5	Ньєпса/Nierse	G296552E65184S	159.778	206.389	14.1947
6	Віггінс/Wiggins	G296015E65251S	065.600	178.556	15.5061
7	Бассі/Bussey	G296044E65278S	039.059	148.685	14.7347
8	Лінд/Lind	G296026E65400S	022.572	135.123	16.8472

Використання ідентифікаційних кодів льодовиків є важливим для просторового аналізу швидкостей льодового потоку, оскільки забезпечує однозначне співставлення отриманих результатів із конкретними льодовиковими об'єктами.

1.3. Роль української антарктичної станції у вивченні Західної Антарктики

Українська антарктична станція «Академік Вернадський» розташована на мисі Марина острова Галіндез, що входить до складу Аргентинських островів архіпелагу Вільгельм. До півострова Київ віддалена на 10 кілометрів.

З 1993 року роботу станції забезпечує Національний антарктичний науковий центр (НАНЦ) – державна наукова установа Міністерства освіти та науки України. До 1996 року станція перебувала під управлінням Великої Британії та мала назву «Фарадей». Після передачі Україні вона отримала назву «Академік Вернадський» на честь видатного українського вченого Володимира Вернадського [15].

Безпосередньо на станції, починаючи рівно опівночі, що три години 8 разів на добу за всесвітнім скоординованим часом вчені знімають показники.

Фіксують температуру та вологість повітря, атмосферний тиск, хмарність, силу вітру, опади тощо. Отримані результати закодовують та відправляють до Всесвітньої метеорологічної організації.

Безперервні метеорологічні спостереження на станції дають змогу аналізувати зміни кліматичних умов у районі Антарктичного півострова та співставляти їх зі змінами швидкостей льодового потоку.

Дані дистанційного зондування дозволяють визначати швидкості руху льоду та аналізувати просторові особливості льодовикових систем. Водночас результати супутникового моніторингу потребують порівняння з наземними спостереженнями. У цьому контексті особливого значення набувають метеорологічні дані станції «Академік Вернадський», які дають можливість встановлювати взаємозв'язок між змінами температурного режиму та динамікою льодових мас.

Висновки до розділу 1

У результаті виконання фізико-географічних досліджень району у межах першого розділу встановлено, що в умовах інтенсивних кліматичних змін швидкість руху льодових потоків є ключовим індикатором стану кріосфери. Традиційні наземні геодезичні вимірювання в Антарктиці суттєво обмежені через суворий клімат та небезпечний рельєф, що зумовлює пріоритет всепогодних методів дистанційного зондування Землі. Оптимальним інструментом для розрахунку горизонтальних зсувів визначено радарний метод відстеження зміщення амплітудних ознак (SAR Offset Tracking).

Півострів Київ та розташована на ньому група льодовиків відрізняються високою концентрацією динамічних вивідних льодовиків (Труз, Лі, Талбот, Левер тощо), які безпосередньо контактують з океаном. На основі міжнародної класифікації WGMS виділено та проаналізовано базові морфометричні параметри цих об'єктів (площу, товщину, середній нахил), що є

фундаментальною основою для подальшого цифрового картографування швидкостей їхнього руху.

УАС «Академік Вернадський» виступає стратегічним опорним пунктом для проведення комплексного екологічного та геофізичного моніторингу полярного регіону. На відміну від даних дистанційного зондування Землі є безпосередніми. На станції вітчизняні дослідники-полярники забезпечують безперервний збір метеорологічних та гляціологічних даних, які, на відміну від результатів дистанційного зондування Землі, є безпосередніми вимірюваннями.

РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ТА ТЕХНОЛОГІЇ СУПУТНИКОВОГО МОНІТОРИНГУ ЛЬОДОВИКОВИХ ПОТОКІВ

2.1. Радіолокаційні методи дистанційного зондування Землі та інструменти обробки даних

2.1.1 Принцип роботи радіолокаційних систем із синтезованою апертурою (SAR)

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) – це сукупність методів отримання інформації про поверхню Землі, атмосферу та океани без безпосереднього контакту з об'єктом дослідження. Основним джерелом таких даних є аерокосмічні засоби спостереження, оснащені спеціальними сенсорами, які реєструють електромагнітне випромінювання у різних діапазонах спектра.

Сенсори дистанційного зондування поділяються на пасивні та активні. Пасивні сенсори реєструють природне випромінювання об'єктів або відбите сонячне світло. До них належать оптичні та інфрачервоні системи, встановлені на більшості супутників спостереження Землі. Їхнім недоліком є залежність від освітленості та погодних умов. Проте активні сенсори самостійно випромінюють електромагнітний сигнал і реєструють його відбиття від поверхні. До таких систем належать радіолокатори із синтезованою апертурою (Synthetic Aperture Radar, SAR) [3].

SAR є активною радіолокаційною системою, принцип роботи якої полягає у випромінюванні мікрохвильових імпульсів та реєстрації сигналу, відбитого від земної поверхні. Під час руху супутника вздовж орбіти радіолокатор із синтезованою апертурою здійснює знімання смуги земної поверхні, розташованої збоку від траєкторії польоту, реєструючи відбиті від неї радіолокаційні сигнали. Отримані послідовні відлуння обробляються спеціальними алгоритмами та об'єднуються в єдине зображення. Такий підхід дозволяє сформувати віртуальну або «синтезовану» антену значно більшого

розміру, ніж реальна антена супутника, що забезпечує високу просторову роздільну здатність отриманих даних.

Однією з головних переваг SAR є незалежність від природного освітлення. Оскільки радар самостійно генерує сигнал, знімання можуть виконуватися як удень, так і вночі. Крім того, мікрохвильове випромінювання здатне проникати крізь хмари, туман та опади, що дозволяє отримувати дані практично за будь-яких погодних умов. Ця особливість є особливо важливою для полярних регіонів, де значна хмарність та тривалі періоди полярної ночі суттєво обмежують можливості використання оптичних супутникових систем.

Яскравість пікселів на радіолокаційному зображенні визначається інтенсивністю сигналу, відбитого від поверхні та зареєстрованого супутниковим радаром. Кожен піксель характеризує відбивну здатність відповідної ділянки місцевості. Світлі тони відповідають об'єктам, які ефективно відбивають електромагнітне випромінювання у напрямку антени радара, тоді як темні тони свідчать про слабе повернення сигналу.

Високі значення зворотного розсіювання зазвичай характерні для скельних виходів, урвищ, гірських схилів та інших нерівних поверхонь. Такі об'єкти відбивають значну частину енергії радіолокаційного сигналу назад до супутника, тому на зображенні відображаються яскравими пікселями.

Для відносно гладких поверхонь, зокрема снігу, льоду або спокійної водної поверхні, характерне дзеркальне відбиття сигналу. У цьому випадку більша частина енергії відбивається в напрямках, відмінних від напрямку на супутник, тому назад повертається лише незначна частина випромінювання. Такі ділянки мають низькі значення зворотного розсіювання та відображаються темними тонами.

На величину зворотного розсіювання також впливають шорсткість поверхні, наявність тріщин, вологість снігу та льоду, а також кут падіння радіолокаційного променя. Завдяки цьому SAR-знімки містять інформацію не лише про форму об'єктів, а й про фізичні властивості поверхні, що робить їх

особливо цінними для дослідження льодовикових систем та аналізу змін їхнього стану.

Супутникові технології є найефективнішими для моніторингу льодового покриву важкодоступних районів. Висока чутливість SAR до структури та стану поверхні льоду дозволяє здійснювати моніторинг меж льодовиків, виявляти зміни льодовикового покриву, визначати швидкості переміщення льодових мас та аналізувати особливості їхньої динаміки. Для цього використовуються різні методи обробки радіолокаційних даних, зокрема інтерферометрія та Offset Tracking.

В умовах Антарктики використання SAR є одним із найбільш ефективних способів дослідження льодовиків. Завдяки регулярному надходженню даних із супутників серії Sentinel-1 забезпечується можливість систематичного спостереження за рухом льодових мас на великих територіях. Отримані результати дозволяють оцінювати сучасний стан льодовикових систем, досліджувати їхню реакцію на кліматичні зміни та створювати карти швидкостей льодового потоку.

2.1.2 Супутник Sentinel-1 та його характеристики

Супутники серії Sentinel-1 є складовою європейської програми спостереження за Землею Copernicus, яка реалізується Європейською комісією спільно з Європейським космічним агентством (ESA). Основною метою програми є забезпечення безперервного отримання даних дистанційного зондування для моніторингу навколишнього середовища, кліматичних змін, природних ресурсів та надзвичайних ситуацій.

Орбітальне угруповання Sentinel-1 спочатку складалося з двох супутників – Sentinel-1A та Sentinel-1B, запущених у 2014 та 2016 роках відповідно. Обидва апарати оснащені радіолокатором із синтезованою апертурою (SAR), який працює у С-діапазоні на частоті 5,405 ГГц. Така довжина хвилі забезпечує

ефективне дослідження земної поверхні, включаючи льодовикові покриви, незалежно від погодних умов та освітлення [8].

Супутники Sentinel-1 здійснюють знімання у кількох режимах роботи, серед яких найбільш поширеним для досліджень суходолу є режим Interferometric Wide Swath (IW). У цьому режимі забезпечується ширина смуги знімання близько 250 км при просторовій роздільній здатності приблизно 5×20 м. Після стандартної обробки дані можуть бути представлені з розміром пікселя близько 10 м, що є достатнім для дослідження динаміки льодовиків регіонального масштабу.

Супутники перебувають на сонячно-синхронній навколополярній орбіті на висоті близько 693 км. За наявності двох супутників період повторного знімання однієї й тієї самої території становив близько 6 діб, що забезпечувало регулярне оновлення даних. Навіть після виходу з ладу Sentinel-1B супутник Sentinel-1A продовжує забезпечувати систематичні спостереження, які є важливими для довготривалого моніторингу природних процесів.

Дані Sentinel-1 широко використовуються для дослідження льодовикових систем Антарктики. Основними перевагами цих даних є незалежність від хмарності та сонячного освітлення, висока періодичність знімання, значне просторове охоплення та вільний доступ до архівів даних. Це дозволяє отримувати інформацію про переміщення льодових мас навіть у важкодоступних районах, де проведення регулярних наземних спостережень є складним або неможливим.

Завдяки високій стабільності орбіти та однорідності отримуваних даних супутники Sentinel-1 стали одним із основних джерел інформації для визначення швидкостей льодового потоку. На основі послідовних радіолокаційних знімків можна відстежувати зміщення характерних елементів поверхні та розраховувати швидкість руху льоду за допомогою методу Offset Tracking, який використовується в даному дослідженні.

Використання даних супутникової місії Sentinel-1 забезпечує можливість детального моніторингу швидкостей льодового потоку навіть у складних погодних умовах та за відсутності сонячного освітлення, що є критично важливим для антарктичних регіонів.

2.1.3 Програмний комплекс SNAP

SNAP (Sentinel Application Platform) – це безкоштовне програмне забезпечення з відкритим кодом, розроблене Європейським космічним агентством (ESA) [11]. Воно є основним інструментом для обробки, аналізу та візуалізації даних дистанційного зондування Землі, зокрема радіолокаційних даних з супутників місії Copernicus (передусім Sentinel-1).

Для роботи з радаром в архітектуру SNAP інтегровано спеціалізований інструментарій – S1TBX (Sentinel-1 Toolbox).

Радіолокаційні дані мають специфічну природу (геометричні спотворення, спекл-шум), тому перед аналізом вони потребують обов'язкової попередньої обробки. SNAP автоматизує ці процеси завдяки таким інструментам:

1. **Калібрування (Calibration).** Переводить сирі значення цифрових рівнів (Digital Numbers) у фізичні величини – коефіцієнт зворотного розсіювання (σ^0 - сигма-нуль, β^0 - бета-нуль або γ^0 - гамма-нуль). Це необхідно для порівняння знімків, зроблених у різний час.
2. **Ортотрансформація та корекція рельєфу (Terrain Correction).** Оскільки радар знімає під кутом, рельєф викликає сильні спотворення (ефекти насування, затінення). Інструмент Range Doppler Terrain Correction у SNAP автоматично завантажує цифрову модель рельєфу (DEM), наприклад Copernicus DEM або SRTM, і виправляє геометрію знімка, прив'язуючи його до географічної карти.
3. **Фільтрація спекл-шуму (Speckle Filtering).** SAR-знімки мають специфічну «зернистість» (шум), що виникає через інтерференцію сигналів. SNAP містить класичні та адаптивні фільтри (Lee, Frost, Gamma

Map, Refined Lee) для пригнічення цього шуму із збереженням меж об'єктів.

4. **Інтерферометрія (InSAR).** SNAP дозволяє працювати з двома знімками, зробленими з тієї самої точки, але в різний час, для: створення точних цифрових моделей рельєфу (DEM) та моніторингу мікрозсувів земної поверхні (внаслідок руху льодовиків, землетрусів, вулканізму, просідання міст чи шахт).
5. **Поляриметрія (PolSAR).** Супутники Sentinel-1 можуть випромінювати та приймати хвилі у різних поляризаціях (VV, VH). SNAP підтримує декомпозицію сигналів, що допомагає розрізняти типи поверхонь (наприклад, класифікувати льодовики, ліси, міську забудову, водойми чи сільськогосподарські культури).

2.2. Метод відстеження зміщення (Offset Tracking)

Метод відстеження зміщень призначений для визначення горизонтальних переміщень досліджуваної території, які відбулися за час між двома сеансами супутникового знімання. В основі методу лежить зіставлення двох амплітудних (інтенсивнісних) зображень радарів із синтезованою апертурою (SAR), які отримані з однієї орбіти, але в різні моменти часу (так звана «майстер-пара» знімків).

Відстеження зсуву – це метод, який вимірює рух об'єктів між двома зображеннями за допомогою оптимізації крос-кореляції інтенсивності ділянок. Він широко використовується для оцінки руху льодовиків.

Суть алгоритму пошуку зміщень.

1. Ідентифікація маркерів поверхні. Головна ідея методу полягає у пошуку ідентичних фрагментів або локальних неоднорідностей на поверхні льодовика. Такими природними маркерами виступають тріщини, нерівності, зони торошення чи уламковий матеріал. Оскільки льодовий

потік перебуває в постійному русі, ці структури змінюють своє положення у просторі за час між зйомками.

2. Обчислення просторового зсуву: Спеціалізоване програмне забезпечення аналізує часові серії знімків, знаходить характерні форми рельєфу та визначає вектор їхнього зміщення (дистанцію у метрах).

Математичний розрахунок швидкості руху льодовика є прямою функцією від знайденої відстані та часу:

$$V = \frac{S}{\Delta t}$$

де S – величина просторового зміщення (відстань у метрах),

Δt – часовий інтервал між знімками (темпоральна розрізненість).

Для фіксації швидких переміщень льодових мас цей часовий інтервал має бути мінімальним. Супутникова місія Sentinel-1 повною мірою задовольняє цю умову, забезпечуючи регулярне знімання з інтервалом у 6–12 днів.

Результатом такої обробки є матричне зображення (растр), де кожен окремий піксель відображає розраховане значення добової або річної швидкості руху льодовика на конкретній ділянці.

2.3. Алгоритм створення карти швидкостей льодового потоку в SNAP

Вхідні дані, використані для цього дослідження, завантажені з веб-сайту Copernicus browser (рис. 2.1).

Джерела даних: Sentinel-1A, C-SAR, Level-1 GRD (Ground Range Detected).

Параметри:

- серійний ідентифікатор платформи – S1A ();
- напрямок орбіти – Descending (низхідна орбіта, рух супутника з півночі на південь);
- номер відносної орбіти – 82;

- оперативний режим – IW (interferometric wide swath - інтерферометричний широкий діапазон, роздільна здатність знімків);
- дати знімків: 22 лютого, 6 березня 2026 року. Для отримання надійних результатів пара зображень для обробки повинна бути на одній орбіті з інтервалом 12 днів.

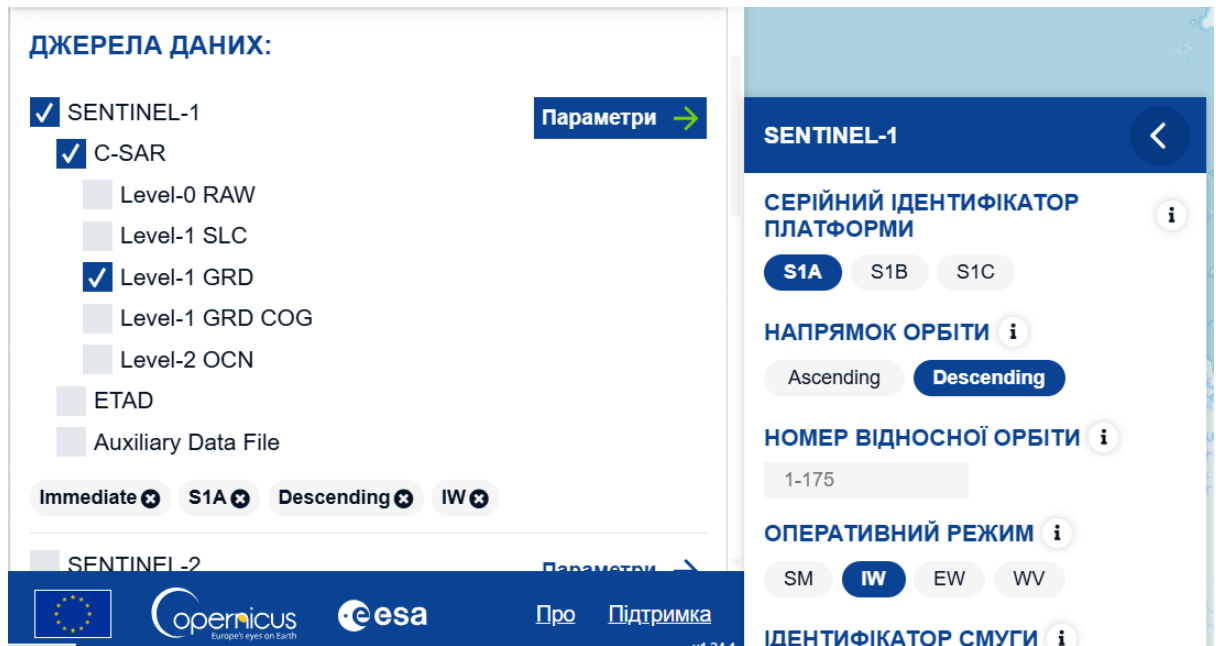


Рис. 2.1. Copernicus browser [10]

Алгоритм цифрової обробки супутникових радіолокаційних даних [12] технологічні схеми [13]:

1. Завантаження знімків. Відкрийте SNAP. На верхній панелі інструментів натисніть Open Product і знайдіть розташування двох продуктів GRD. Виберіть файл manifest.safe з кожної папки продукту S1 і натисніть Open Product. Натисніть і утримуйте клавішу Ctrl на клавіатурі, щоб вибрати кілька продуктів одночасно. Також можна вибрати продукти стиснуті у zip-файлах. Відкриті продукти з'являться у вікні Product Explorer.
2. Огляд вміст продукту. Натисніть +, щоб розгорнути продукт. Потім розгорніть папку Bands, у межах якого є два діапазони продукту:

- Amplitude_НН діапазон амплітуди, який фактично знаходиться в продукті. ; двічі клацніть на діапазоні Amplitude_НН. Збільшіть масштаб за допомогою коліщатка миші та перемістіть зображення, клацнувши та перетягнувши ліву кнопку миші. Зображення перевернуте догори дригом, бо було отримано за допомогою висхідного проходу та антени, спрямованої праворуч, тому спочатку зчитується нижня частина області зображення, і в SNAP перша зчитувана лінія завжди відображається поверх зображення.
 - Intensity_НН віртуальний діапазон інтенсивності, який допомагає працювати з даними GRD. Двічі клацніть на Intensity_НН, щоб візуалізувати. Зображення виглядає як «дзеркальне»: це тому, що сцена була отримана під час низхідного проходу (супутник рухався в напрямку з півночі на південь, дивлячись праворуч (у цьому випадку на захід)), і зображення показує пікселі в порядку отримання даних, оскільки зображення ще не спроектовано в картографічні координати.
3. Виконання блок-схеми 1 (рис. 2.2). Щоб застосувати всі кроки до обох зображень одночасно використайте інструмент пакетної обробки Tools → GraphBuilder. На даний момент графік має лише два оператори: Read (для читання вхідних даних) та Write (для запису вихідних даних).
- 3.1. Оновіть метадані орбіти. Вектори стану орбіти, надані в метаданих продукту SAR, зазвичай не є точними та їх можна уточнити за допомогою точних файлів орбіти, які доступні через кілька днів або тижнів після створення продукту. Файл орбіти надає точну інформацію про положення та швидкість супутника. На основі цієї інформації оновлюються вектори стану орбіти в абстрактних метаданих продукту. Щоб додати оператор, клацніть

правою кнопкою миші на пробілу між існуючими операторами та перейдіть до Add → Radar → Apply-Orbit-File. Новий прямокутник оператора з'єднайте з оператором Read, клацнувши праворуч від оператора Read та перетягнувши червону стрілку до оператора Apply-Orbit-File.

3.2. Видаліть тепловий шум. Тепловий шум на зображеннях SAR – це фонові енергія, що генерується самим приймачем. Він спотворює відбивну здатність радіолокатора в бік вищих значень і знижує точність оцінок відбивної здатності радіолокатора. Продукти рівня 1 надають шумову LUT для кожного набору даних вимірювань, що надається в лінійній потужності, яку можна використовувати для видалення шуму з продукту. Клацніть правою кнопкою миші на білому просторі ліворуч від оператора та перейдіть до пункту Add → Radar → Radiometric → ThermalNoiseRemoval. З'єднайте оператор ThermalNoiseRemoval з оператором Apply-Orbit-File.

3.3 Додайте оператор калібрування. Метою калібрування SAR є надання зображень, у яких значення пікселів можна безпосередньо пов'язати зі зворотним розсіюванням радара. Хоча некаліброваних зображень SAR достатньо для якісного використання, калібровані зображення SAR є важливими для кількісного використання даних SAR. Типова обробка даних SAR, яка створює зображення рівня 1, не включає радіометричні корекції, і залишається значне радіометричне зміщення. Радіометрична корекція необхідна для того, щоб значення пікселів достовірно відображали зворотне розсіювання радара від відбиваючої поверхні, а отже, для порівняння зображень SAR, отриманих різними датчиками або отриманих з одного й того ж датчика, але в різний час, у різних режимах або оброблених

різними процесорами. Щоб додати оператор, перейдіть до Add → Radar → Radiometric → Calibration. Підключіть оператор калібрування до оператора ThermalNoiseRemoval та оператора Write. Збережіть графік натиснувши кнопку Save внизу вікна. Після збереження закрийте вікно GraphBuilder.



Рис 2.2. Блок-схема 1

4. У вікні Product Explorer виберіть продукт 1. Відкрийте інструмент Tools → Batch Processing. Додайте обидва відкриті продукти, натиснувши Add Opened у верхньому правому куті (другий значок зверху), а потім натиснувши Refresh (другий значок знизу). Потім натисніть Load Graph внизу вікна, перейдіть до збереженого графіка та відкрийте його. Бачимо, що у верхній частині вікна з'явилися нові вкладки, що відповідають операторам, за винятком Write; це правильно, оскільки ці параметри будуть встановлені на вкладці I/O Parameters. На вкладці I/O Parameters встановіть для «Каталогу» значення та переконайтеся, що вибрано опцію “Keep source product name”. На вкладці Apply-Orbit-File приймаємо налаштування за замовчуванням. На вкладці ThermalNoiseRemoval виберіть поляризацію HH та переконайтеся, що вибрано опцію «Remove Thermal Noise». На вкладці Calibration також прийміть всі налаштування за замовчуванням, а потім натисніть кнопку Run. У вікні Product Explorer має з'явитися 2 нових продукти. Закрийте вікно Batch Processing.
5. Спільна реєстрація та відстеження зміщення, блок схема 2 (рис. 2.3). Відкрийте Graph Builder. Клацніть на оператор Write правою кнопкою миші та виберіть Delete. Потім клацніть правою кнопкою миші на білому просторі та перейдіть Add → Input-Output → Read.

Додайте оператор Add → Radar → Coregistration → DEM-Assisted-Coregistration та підключіть до нього обидва оператори Read. Додайте оператор Add → Raster → Geometric → Subset та підключіть до нього оператор DEM-Assisted-Coregistration. Додайте оператор Add → Radar → SAR Applications → Offset-Tracking та оператор Add → Input-Output → Write, щоб продовжити відстеження зсуву та зберегти цю підмножину окремо. Підключіть оператор Subset до операторів Offset-Tracking та Write. Додайте ще один оператор Write та підключіть до нього оператор Offset-Tracking, щоб зберегти кінцевий продукт. Результатом відстеження зміщення є не лише растр, а й векторний точковий шар, що містить швидкість у кожній наземній контрольній точці (GCP) та додаткову інформацію, яка може бути корисною, таку як напрямок руху та компоненти напрямку. SNAP наразі не пропонує оператору експортувати векторний шар у вигляді графіка. Під графіком з'явилися вкладки, що відповідають кожному з операторів. Розгляньте їх одну за одною, щоб налаштувати всі параметри. На вкладці DEM-Assisted-Coregistration встановіть Digital Elevation Model: ACE30 (Auto Download). Кореєстрація зображень – це процес геометричного вирівнювання двох або більше зображень таким чином, щоб відповідні пікселі представляли ідентичну область на поверхні Землі. На вкладці Subset в розділі Pixel Coordinates встановіть координати області, яка цікавить. POLYGON(-64.2722 -65.5245, -63.2276 -65.5245, -63.2276 -65.0259, -64.2722 -65.0259, -64.2722 -65.5245), щоб скоротити час обробки. На вкладці Offset Tracking встановіть інтервал сітки GCP у пікселях у напрямках дальності та азимута (визначає роздільну здатність/рівень деталізації нашого добутку швидкості) на 60 пікселів (600 м) в обох напрямках, цей баланс між рівнем деталізації та плавністю нашого виводу достатній

для наших цілей (також: чим вища роздільна здатність => тим довший час обробки). Далі встановіть розміри вікна реєстрації, який залежить від максимальної швидкості льодовика та періоду між збиранням даних, за замовчуванням 128 пікселів (1280x1280 м). Встановіть відому максимальну швидкість льодовиків на рівні 4 м/день. На вкладці Write встановіть назву продукту на productname_Stack. На вкладці Write2 встановіть productname _vel. Натисніть кнопку Save, а потім Run. Після завершення обробки закрийте вікно Graph Builder. У вікні Product Explorer з'явилися два нових продукти.

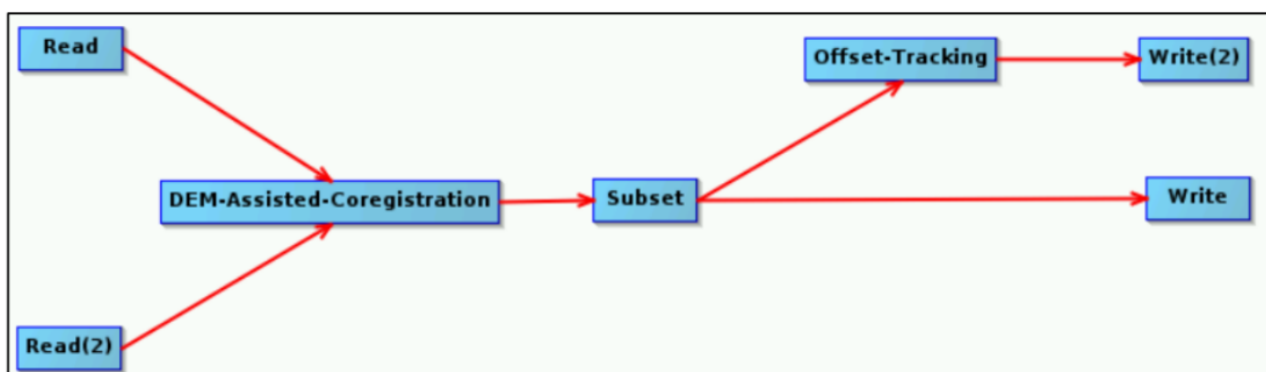


Рис 2.3. Блок-схема 2

6. Об'єднання двох виходів в один продукт. Клацніть правою кнопкою миші на перший продукт та відкрийте діалогове вікно BandMath. Встановіть Name на Sigma0_NH_22Feb2026 та зніміть позначку з опції Virtual (save expression only, don't store data). Натисніть ОК.
7. Отримуємо карту швидкостей льодового потоку.

Висновки до розділу 2

У другому розділі проведено комплексний аналіз теоретико-методологічних засад, інструментальних засобів та алгоритмів, що застосовуються для супутникового моніторингу динаміки льодовиків. За результатами аналізу сформульовано такі висновки:

1. Обґрунтовано ефективність використання радіолокаційних методів ДЗЗ (зокрема систем із синтезованою апертурою – SAR) для моніторингу полярних регіонів. На відміну від оптичних систем, радарне знімання є стійким до несприятливих метеорологічних умов та незалежним від умов освітленості (полярної ночі чи щільної хмарності), що є критично важливим для регулярного спостереження за льодовиками Західної Антарктики.
2. Визначено потенціал супутникового угруповання Sentinel-1, дані якого є оптимальним джерелом інформації для розв'язання поставленої задачі завдяки високій просторовій розрізненій здатності, регулярності знімання та безкоштовному відкритому доступу. Характеристики сенсора SAR дозволяють стабільно фіксувати текстурні особливості льодової поверхні для подальшого відстеження її зміщень.
3. Обґрунтовано вибір програмного комплексу SNAP (Sentinel Application Platform) як основного інструменту обробки радарних знімків. Дане спеціалізоване середовище розробки Європейського космічного агентства (ESA) містить повний набір необхідних алгоритмів для препроцесингу SAR-даних, геометричної корекції та розрахунку векторів руху льодових мас.
4. Описано метод відстеження зміщення (Offset Tracking), який є найбільш ефективним підходом для визначення швидкостей швидких льодових потоків, де класична інтерферометрія (InSAR) може втрачати когерентність (збереження фази сигналу між двома зніманнями) через значні деформації або танення снігового покриву. Метод, що базується на крос-кореляції інтенсивності амплітудних зображень, дозволяє надійно оцінювати як субпіксельні зсуви (менші, ніж розмір одного пікселя), так і значні зміщення льодовика за певний проміжок часу.
5. Сформовано алгоритм створення карти швидкостей льодового потоку в SNAP, який охоплює етапи виконання блок-схем та об'єднання двох

виходів в один продукт, який містить дані швидкостей льодового потоку за певний період часу.

РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЇХ ПРАКТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ

3.1. Аналіз отриманих результатів

Практична реалізація розробленої технологічної схеми та алгоритмів цифрової обробки супутникових радіолокаційних даних місії Sentinel-1 дозволила розрахувати просторово-кінематичні параметри руху льодовикових систем півострова Київ. Кінцевим результатом проведеного комплексу препроцесингу, спільної реєстрації та амплітудної крос-кореляції в середовищі SNAP стала побудована тематична растрова модель розподілу швидкостей переміщення льодових мас досліджуваного регіону (рис. 3.1.)

Інформаційною основою для створення карти слугувала пара знімків у режимі Interferometric Wide Swath (IW) із 12-денним часовим інтервалом (22 лютого – 6 березня 2026 року). Такий період є оптимальним для надійного відстеження структурних ознак і текстурних мікросувів поверхні льодовика. Отримана геокодована карта швидкостей у системі координат WGS-84 (проекція UTM, зона 20S) уможливорює проведення детального числового та просторового аналізу гляціодинамічної активності вивідних льодовиків.

Візуалізація інтенсивності руху льоду виконана за допомогою безперервної колірної шкали в діапазоні від 0 до 2 м/добу. Області, пофарбовані у сині та темно-зелені відтінки, відповідають статичним ділянкам, зонам затінення рельєфу та крижаним розділам на плато, де швидкість зміщення є мінімальною (0,0 – 0,5 м/добу). Перехід до жовтого та помаранчевого кольорів фіксує магістральні транспортні канали вивідних льодовиків зі стабільним транзитом маси (1,5 – 2,5 м/добу). Яскраво-червоні зони чітко локалізують області екстремального динамічного прискорення (3,56 – 4,45 м/добу), які зосереджені виключно у пригирлових частинах (наприклад, льодовика Труз) при виході крижаного язика в акваторію затоки.

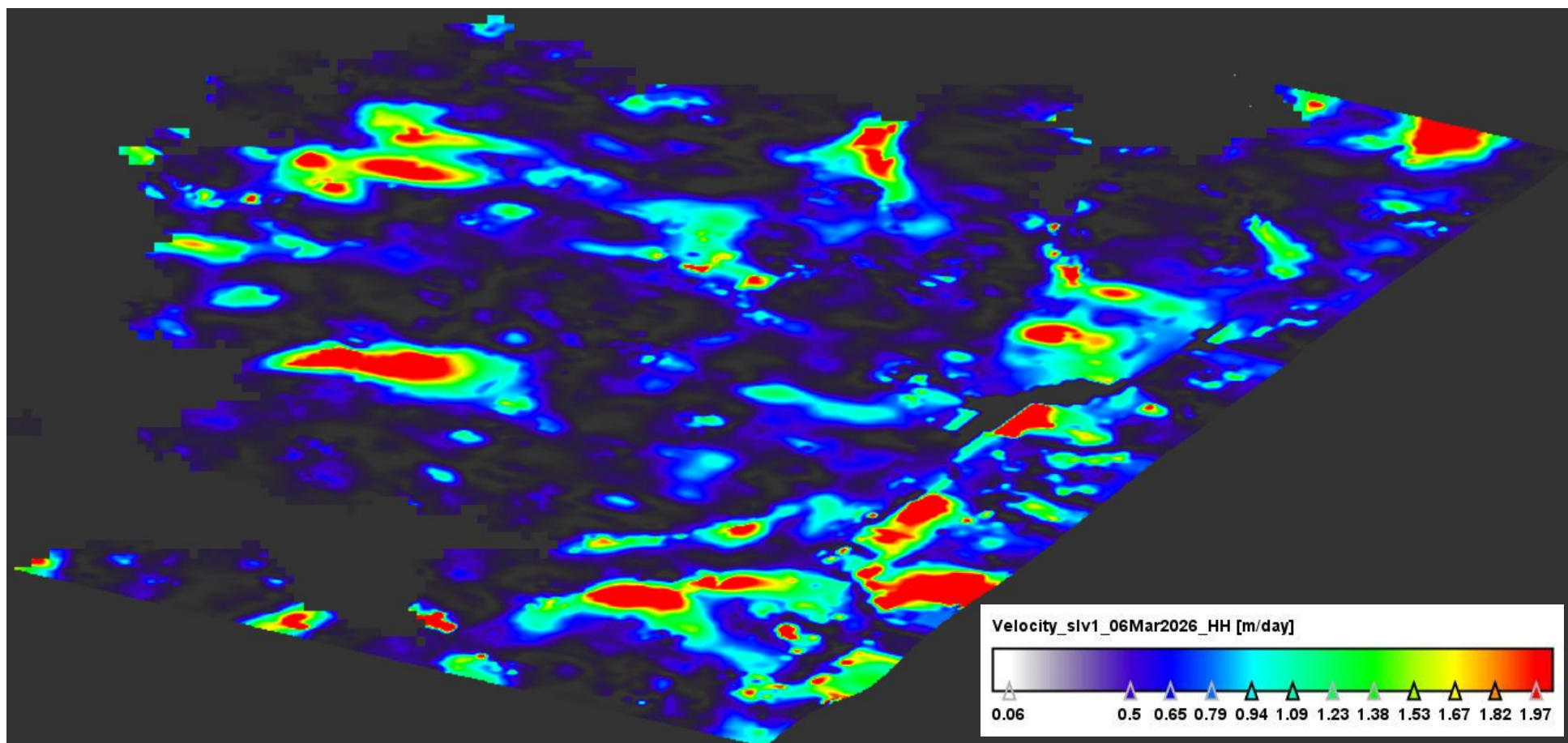


Рис. 3.1. Карта швидкостей льодового потоку на прикладі льодовиків півострова Київ, Західна Антарктика



Рис. 3.2. Карта вивідних льодовиків регіону дослідження [14]

На основі розрахованих даних було проаналізовано кінематику ключових вивідних льодовиків регіону (рис. 3.2), зафіксованих у каталозі WGMS:

1. Льодовик Труз як найбільший гляціальний об'єкт півострова площею 567,808 км² та товщиною 313,885 м, демонструє найвищу динамічну активність. Усереднені фонові швидкості у його верхній та середній течії становлять 1,8 – 2,4 м/добу. Проте в пригирловій частині, на відстані близько 3 км від фронту впадання у затоку Коллінз, зафіксовано локальне динамічне прискорення, де абсолютні максимальні швидкості руху в аналізований літній період досягли 3,65 м/добу. Це підтверджує тривалу тенденцію нестабільності його термінальної межі та інтенсивного масоперенесення крижаного матеріалу з внутрішнього плато.
2. Льодовик Лі площею 241,859 км² та значним середнім нахилом поверхні 13,3°, рухаючись у напрямку затоки Жирар, демонструє стабільні швидкості переміщення, які в осьовій зоні магістрального каналу становлять 2,10 – 2,55 м/добу. Високі градієнти швидкостей на краях потоку супроводжуються зонами інтенсивної структурної деформації та утворенням глибоких тріщин.
3. Льодовик Талбот впадає у води Фландрійської затоки, де його фронтальна частина піддається активному термоабразивному впливу морських вод. Максимальні швидкості зміщення льодових мас у гирлі Талбота зафіксовані на рівні 2,30 м/добу.
4. Льодовик Левер простягається щонайменше на 10 км у довжину до верхів'я затоки Бісочі, маючи площу 177,871 км². Швидкість руху в межах головного транспортного русла варіюється в діапазоні 1,65–1,95 м/добу.
5. Льодовик Ньєпса при відносно невеликій площі (159,778 км²) володіє значним середнім крутизною нахилу ложа – 14,19°. У зоні його з'єднання

з льодовиком Дагера та впадання в бухту Лозанна швидкість руху крижаного потоку становить 1,40 – 1,75 м/добу.

Проведений аналіз виявив чітку диференціацію району за ступенем динамічної активності. Стабільні внутрішні зони крижаного плато характеризуються швидкостями, близькими до нульових значень (0,05–0,2 м/добу), тоді як магістральні канали вивідних льодовиків виступають основними транспортними артеріями розвантаження льодового щита в океан. Прискорення руху наприкінці літнього сезону 2026 року пояснюється дискретно-поступальним характером руху льоду: підвищення температури повітря та танення снігового покриву призводять до проникнення талої води до базального ложа льодовика, що різко знижує коефіцієнт тертя та провокує короточасні імпульси гідродинамічного прискорення мас.

3.2. Перспективи практичного використання даних

Розроблена методична схема та отримані результати цифрового картографування швидкостей руху льодовикового покриву півострова Київ мають чітко виражене прикладне значення та широкі перспективи впровадження як у науково-моніторингову діяльність, так і в освітній процес.

Основними напрямками практичного використання результатів дослідження є:

— Інтеграція в системи полярного моніторингу НАНЦ України.

Створені цифрові растрові карти та векторні поля швидкостей є надійним джерелом просторово-часової інформації для Національного антарктичного наукового центру України. Зважаючи на безпосередню близькість району дослідження до української антарктичної станції «Академік Вернадський» (близько 10 км) , ці дані доповнюють базу гляціодинамічних спостережень за станом кріосфери Землі Греяма. Вони дозволяють оцінювати об'єми твердого стоку льоду та

прогнозувати процеси кальвінгу (відколювання айсбергів) у прилеглих акваторіях.

— **Валідація та калібрування регресійних кліматичних моделей.**

Оскільки на станції «Академік Вернадський» кожні три години здійснюються прямі високоточні метеорологічні вимірювання (зокрема, температури повітря), отримані супутникові значення швидкостей на конкретні дати лютого-березня 2026 року слугують еталоном для встановлення математичних кореляційних зв'язків між термічними тригерами довкілля та кінематичною відповіддю льодовикових систем.

— **Оптимізація та наповнення геоінформаційних баз даних.**

Результати розрахунків та побудовані картографічні моделі усувають дефіцит актуальних просторових гляціологічних даних для важкодоступних та небезпечних регіонів Антарктичного півострова. Вони можуть бути імпортовані у відкриті міжнародні геоінформаційні системи (наприклад, бази даних GLIMS або WGMS) для глобального моніторингу балансу маси полярних кріосферних систем.

— **Впровадження у навчальний процес вищої навчальних закладів.**

Опрацьований технологічний ланцюжок обробки радарних даних Sentinel-1 у SNAP та подальше картографування в ГІС-середовищі мають високу цінність для студентів спеціальності «Геодезія та землеустрій». Матеріали роботи доцільно використовувати як практичну та лекційну основу під час вивчення дисциплін «Космічна геодезія», «Дистанційне зондування Землі» та «Геоінформаційні системи і технології». Це дозволить студентам опанувати сучасні радарні методи обробки амплітудної та фазової інформації для вирішення прикладних екологічних та геодезичних завдань.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі проведено практичну реалізацію розробленого алгоритму цифрової обробки радіолокаційних знімків та виконано детальний аналіз динаміки руху льодовикових систем, на основі чого сформульовано такі висновки:

1. Реалізовано повний цикл обробки радарних даних Sentinel-1 у середовищі SNAP за період з 22 лютого по 6 березня 2026 року. Застосування інструментів препроцесингу, точної корекції орбіт, спільної реєстрації та ортотрансформації рельєфу (Terrain Correction) дозволило створити суцільну геометрично коректну модель швидкостей у системі координат WGS-84 (проекція UTM 20S) з високим ступенем просторової точності.
2. Кількісно оцінено кінематичні параметри ключових вивідних льодовиків півострова Київ. Встановлено, що середні швидкості переміщення магістральних крижаних потоків варіюються в межах 1,4–2,5 м/добу. Абсолютне максимальне значення швидкості зафіксовано в пригирловій зоні найбільшого об'єкта дослідження — льодовика Труз, де воно досягло 3,65 м/добу наприкінці антарктичного літа.
3. Підтверджено просторову неоднорідність гляціодинаміки регіону, яка проявляється у різкому прискоренні льодових потоків при наближенні до термінальних фронтів їхнього впадання у затоки Фландрія, Бісочі та Коллінз. Дане явище зумовлене процесами базального ковзання під дією талої води та термоабразивним підмиванням льодовикових язиків відносно теплими морськими водами.
4. Обґрунтовано високе прикладне та наукове значення отриманих геопросторових результатів. Доведено, що створені цифрові карти та векторні поля швидкостей руху є цінним матеріалом для передачі в НАНЦ України з метою регулярного кліматичного та кріосферного моніторингу поблизу УАС «Академік Вернадський». Також вихідні

матеріали слугують готовим методичним базисом для оптимізації підготовки студентів за спеціальністю «Геодезія та землеустрій».

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі вирішено актуальну науково-практичну задачу, що полягає в обґрунтуванні, розробці та практичній реалізації технологічної схеми супутникового радіолокаційного моніторингу і картографування швидкостей зміщення льодових потоків у полярних регіонах. Дослідження виконано на прикладі вивідних льодовикових систем півострова Київ (Західна Антарктика) з використанням сучасних даних дистанційного зондування Землі. За результатами проведеної роботи сформульовано такі загальні висновки:

1. У першому розділі проаналізовано сучасний стан та фізико-географічні особливості району дослідження. Півострів Київ, розташований у межах Землі Грея на Антарктичному півострові, характеризується високою щільністю покривного зледеніння та наявністю мережі активних вивідних льодовиків (Труз, Лі, Талбот, Левер, Ньєпса), які виступають головними каналами скидання льодової маси в океан. Встановлено, що в умовах сучасних глобальних кліматичних змін цей регіон демонструє найвищу динамічну нестабільність кріосфери. Це зумовлює гостру потребу в регулярному моніторингу швидкостей руху льодових потоків як головного індикатора балансу маси антарктичного крижаного щита та деструкції берегової лінії.
2. У другому розділі обґрунтовано вибір радіолокаційних методів ДЗЗ та супутникового угруповання Sentinel-1 як найбільш ефективного інструменту для полярного гляціодинамічного моніторингу. На відміну від оптичних систем, сенсор C-band SAR (радар із синтезованою апертурою) забезпечує отримання високоякісних знімків незалежно від умов освітленості (полярної ночі) та щільного хмарного покриву, характерного для Антарктики. Для визначення кінематики швидких льодових потоків обрано метод відстеження зміщення амплітудних ознак (SAR Offset Tracking). Даний підхід володіє суттєвими

перевагами над класичною радарною інтерферометрією (InSAR), оскільки дозволяє надійно обчислювати вектори швидкостей навіть за умови повної втрати фазового зв'язку (декореляції) сигналу, викликаній інтенсивними деформаціями льоду чи таненням снігу.

Ж Розроблено та реалізовано в програмному комплексі SNAP (Sentinel Application Platform) наскрізну технологічну схему цифрової обробки радарних продуктів Single Look Complex (SLC). Сформовано масив вхідних даних на основі пари знімків Sentinel-1 у режимі Interferometric Wide Swath (IW) за 22 лютого та 6 березня 2026 року з оптимальним 12-денним інтервалом. Процес обробки охоплював точну корекцію орбіт, DEM-асистовану спільну реєстрацію зображень, обчислення субпіксельних зсувів за допомогою крос-кореляції вікон інтенсивності, а також геометричну корекцію рельєфу методом Range Doppler Terrain Correction із залученням глобальної полярної моделі висот ACE30. Це дозволило усунути спотворення бічного огляду радара та виконати точну геодезичну прив'язку результатів у системі координат WGS-84 (проекція UTM, зона 20S).

3. Уперше для літнього сезону 2026 року побудовано цифрову картографічну модель швидкостей зміщення льодового потоку півострова Київ. Кількісний аналіз результатів у третьому розділі підтвердив високу просторову неоднорідність динаміки льоду:
- льодовик Труз продемонстрував найвищу активність — його середні фонові швидкості становлять 1,8–2,4 м/добу, а в пригирловій зоні впадання в затоку Коллінз зафіксовано екстремальне прискорення до 3,65 м/добу;
 - швидкість осьової лінії льодовика Лі визначено в межах 2,10–2,55 м/добу;
 - льодовик Талбот, що зазнає активного термоабразивного впливу у водах Фландрійської затоки, зміщується зі швидкістю до 2,30 м/добу;

— для льодовиків Левер та Ньєпса розраховані модулі швидкостей склали 1,65–1,95 м/добу та 1,40–1,75 м/добу відповідно.

Встановлено, що прискорення руху в літній період носить дискретно-поступальний характер і зумовлене проникненням талої води до базального ложа льодовика, що різко знижує коефіцієнт тертя, а також океанічним підмиванням фронтальних частин.

Доведено високе науково-практичне значення отриманих геопросторових даних. Розроблені електронні карти та цифрові матриці є готовим інформаційним матеріалом для передачі до Національного антарктичного наукового центру (НАНЦ) України з метою наповнення баз гляціологічних спостережень української антарктичної станції «Академік Вернадський» та прогнозування об'ємів скиду льоду в океан.

Обґрунтовано цінність результатів для навчального процесу ВНЗ. Опрацьовані алгоритми обробки радарних амплітудних даних, ГІС-картографування та просторового аналізу впроваджуються в лекційні та практичні курси для студентів спеціальності «Геодезія та землеустрій» (зокрема, в межах дисциплін «Космічна геодезія та астрономія», «Дистанційне зондування Землі», «ГІС і технології»). Це забезпечує підготовку висококваліфікованих фахівців, здатних застосовувати передові аерокосмічні технології для розв'язання глобальних екологічних, геодезичних та моніторингових завдань.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Tretyak, K., & Kukhtar, D. (2022, October). Ice glacier velocity determination using Sentinel-1 data: A case study on Wiggins Glacier, West Antarctica, 2015–2017. In International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2022» (Vol. 2022, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers.
2. Tretyak, K., & Kukhtar, D. (2023). Modeling the Trooz Glacier's movement using air temperature data and satellite SAR observations in 2015–2022. *Ukrainian Antarctic Journal*, 21(1), 24–36. <https://doi.org/10.33275/1727-7485.1.2023.709>
3. Kukhtar, D. (2024). Spaceborne SAR Interferometry or Time Machine for Geodetic Purposes. In: Kołodziejczyk, A., Pyrkosz–Pacyna, J., Grabowski, K., Malinowska, K., Sergijenko, O. (eds) *Selected Proceedings of the 6th Space Resources Conference. SRC 2023. Springer Aerospace Technology*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-53610-6_1
4. Cook, A. J., Vaughan, D. G., Luckman, A. J., & Murray, T. (2014). A new Antarctic Peninsula glacier basin inventory and observed area changes since the 1940s. *Antarctic Science*, 26(6), 614–624. <https://doi.org/10.1017/S0954102014000200>.
5. U.S. Geological Survey. (n.d.). Interactive Atlas of Antarctic Research. Landsat Image Mosaic of Antarctica (LIMA). URL: https://lima.usgs.gov/antarctic_research_atlas/
6. Scientific Committee on Antarctic Research. SCAR Composite Gazetteer of Antarctica. Australian Antarctic Data Centre. <https://data.aad.gov.au/aadc/gaz/scar>
7. GLIMS Consortium. (2005). GLIMS Glacier Database, Version 1. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.7265/N5V98602>
8. Kadurin, S., & Andrieieva, K. (2021). Ice sheet velocity tracking by Sentinel-1 satellite images at Graham Coast Kyiv Peninsula. *Ukrainian Antarctic Journal*, 1, 24-31. <https://doi.org/10.33275/1727-7485.1.2021.663>.

9. Amitrano, D., Guida, R., Di Martino, G., & Iodice, A. (2019). Glacier monitoring using frequency domain offset tracking applied to sentinel-1 images: A product performance comparison. *Remote Sensing*, 11(11), 1322.
<https://www.mdpi.com/2072-4292/11/11/1322>
10. Copernicus Data Space Ecosystem. Copernicus Browser.
<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>
11. European Space Agency. (2025) (n.d.). SNAP download. Science Toolbox Exploitation Platform. <https://step.esa.int/main/download/snap-download/>
12. Lu, J., & Veci, L. (2016, August). S1TBX offset tracking tutorial. Array Systems Computing Inc.; European Space Agency.
<https://step.esa.int/docs/tutorials/S1TBX%20Offset%20Tracking%20Tutorial.pdf>
13. Serco Italia S.p.A. (2018). Glacier Velocity with Sentinel-1 – Petermann Glacier, Greenland: Training Kit – CRYO02 (Version 1.2). European Space Agency; EO4Society.
https://eo4society.esa.int/wp-content/uploads/2022/01/CRYO02_GlacierVelocity_Greenland.pdf
14. QGIS Association. (n.d.). Download QGIS. QGIS.
<https://www.qgis.org/download/>
15. Національний антарктичний науковий центр. Історія станції. Національний антарктичний науковий центр. <https://uac.gov.ua/vernadsky-station/station-history/>

БІБЛІОГРАФІЧНА ДОВІДКА

Тема бакалаврської роботи «Створення карти швидкостей льодового потоку за даними супутника Sentinel-1 на прикладі льодовиків півострова Київ, Західна Антарктика».

Обсяг пояснювальної записки – 48 аркушів, 7 рисунків, 1 таблиця.

Дата закінчення роботи 16.06.2026

Студентка

(підпис)

Тимчишин М. П.
(розшифровка підпису)