

Денис Васильович Кухтар

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри геодезії та землеустрою
Інституту будівництва, архітектури та енергетики

Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (Івано-Франківськ, Україна)

E-mail: denys.kukhtar@nung.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2839-4318>

ДЖЕРЕЛА ДАНИХ СУПУТНИКОВОГО РАДІОЛОКАЦІЙНОГО ЗНІМАННЯ

Стаття є викладом здобутих знань щодо використання різних джерел даних супутникового радіолокаційного знімання для моніторингу природних та техногенних геодинамічних явищ. Розглянуто ресурси для завантаження, візуалізації та попереднього опрацювання радіолокаційних даних. Наведено перелік супутникових місій, дані яких представлено у вільному доступі на сайті активного архівного центру *Alaska Satellite Facility*. Виконано огляд комерційних радіолокаційних місій та особливості результатів їхнього знімання. Розглянуто можливості розширення кола джерел радарних знімків, які можуть бути використані для науково-дослідних цілей, у межах програми Європейської космічної агенції «Місії третьої сторони». Викладена інформація буде корисною для науковців, науково-педагогічних та педагогічних працівників, які використовують дані дистанційного зондування, зокрема радіолокаційні знімки, для освітніх та наукових потреб.

Ключові слова: радіолокаційні знімки; комерційні знімки; супутникові місії; *metalink*; *EO Browser*; *Copernicus Browser*; *ASF*; *EGMS*.

Табл.: 2. Рис.: 2. Бібл.: 19.

Актуальність теми дослідження. Протягом останнього десятиліття спостерігається тенденція щодо збільшення наукового зацікавлення пов'язаного з використанням супутникових радіолокаційних даних. Вважаємо, що це зв'язано з постійним накопиченням все більшої кількості даних [1; 2], систематичністю проведення спостережень, а основне – з політикою відкритого доступу до цього типу даних [3; 4]. Одним з основних рушіїв у цій роботі є програма *Copernicus*. Вона була створена 2014 р. у межах продовження ініціативи Європейського союзу (ЄС) щодо дослідження навколишнього середовища та питань безпеки. Діяльність програми *Copernicus* спрямована на безперервний, всеосяжний та високоякісний моніторинг Землі, який забезпечується даними супутникових, наземних, повітряних та морських спостережень. Актуальність теми використання супутникових радіолокаційних знімків та радіолокаційної інтерферометрії підтверджується великою кількістю публікацій у рейтингових виданнях і журналах. Основні напрями досліджень пов'язані з вивченням природних та техногенних геодинамічних процесів, а також їхній вплив на інженерну інфраструктуру.

Постановка проблеми. Проте представники наукової спільноти в Україні часто задаються запитанням щодо способів та засобів для доступу до даних супутникового радіолокаційного знімання з метою їхнього використання для розв'язку різних наукових, навчально-методичних та прикладних задач.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Предметом дослідження для переважної більшості публікацій є особливості методики опрацювання радіолокаційних даних та порівняння отриманих результатів з іншими геодезичними методами. Тому очевидно, що джерела даних радіолокаційних знімків не описуються детально і представляються у декларативній формі.

Якщо розглядати освітню компоненту досліджень, пов'язаних з використанням супутникових радіолокаційних даних, то кількість контенту в матеріалів для вивчення в Україні складає лише незначну частину серед усіх доступних (зокрема англійських) джерел інформації. Сюди можемо віднести спеціалізовані курси та заходи спрямовані на популяризацію використання даних дистанційного зондування, які проводяться Малою академією наук України [5, 6].

Завданнями європейської програми *Copernicus* є не лише збір та розповсюдження даних, але й реалізація освітньої діяльності. Ця робота направлена на навчання і залучення якнайширшого кола користувачів, які будуть використовувати накопичені дані якісно та професійно. Реалізація цього напрямку проводиться через освітні проекти, семінари, майстер-класи. У результаті отримано базу даних навчальних матеріалів [7], відеоуроків

[8], інструкцій та презентацій. Матеріали тренінгів (навчальні посібники, відеоінструкції, дані для практичних завдань) структуровані за кількома напрямками: земна поверхня, океани та узбережжя, моніторинг ризиків, гідрологія, геологія та кріосфера, атмосфера. Результати радіолокаційного знімання використовуються як вхідні дані для більшості зазначених напрямків досліджень.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Різноманіття методів опрацювання даних супутникового радіолокаційного знімання передбачає використання радарних знімків, які розповсюджуються у вільному доступі та на комерційній основі. При цьому користувач може отримувати дані у вигляді певного типу радіолокаційного знімку (RAW, SLC, GRD та ін.), або уже наперед опрацьовані дані у вигляді сформованих інтерферограм. При цьому, представники наукової спільноти в Україні часто ставляться запитанням щодо способів та засобів для доступу до даних супутникового радіолокаційного знімання з метою їхнього використання для розв'язку різних наукових, навчально-методичних та прикладних задач.

Метою цієї статті є систематизація накопиченого досвіду з пошуку та використання радіолокаційних знімків. Пропонується огляд джерел даних радіолокаційного знімання, що можуть бути використані при опрацюванні багаточасових рядів супутникових знімків, створення диференціальних інтерферограм за парами різночасових знімань, а також для аналізу окремих знімків або їхньої візуалізації.

Виклад основного матеріалу. Важливим кроком на шляху інтеграції України до космічної інфраструктури ЄС та сприянні у використанні даних та ресурсів, наданих програмою Copernicus, було підписання угоди про співпрацю між Європейською Комісією (ЄК) та Державним космічним агентством України, яке відбулося 25 травня 2018 р. [5]. Ця угода стала частиною європейської політики сусідства та східного партнерства для отримання переваг програми Copernicus завдяки спостереженням та використанням даних наземного знімання територій за межами ЄС. У результаті укладання угоди про співробітництво українські державні, академічні та приватні установи отримали вільний доступ до завантаження, опрацювання та аналізу даних та продуктів програми Copernicus. Також дані відкриті та доступні для пересічного користувача.

Радіолокаційні знімки у відкритому доступі. Завданнями програми Copernicus є не лише збір та поширення даних, але й реалізація освітньої діяльності. Ця робота направлена на навчання і залучення якнайширшого кола користувачів, які будуть використовувати накопичені дані якісно та професійно. Реалізація цього напрямку проводиться через освітні проекти, семінари, майстер-класи. У результаті отримано базу даних навчальних матеріалів [6], відеоуроків [7], інструкцій та презентацій. Матеріали тренінгів (навчальні посібники, відеоінструкції, дані для практичних завдань) структуровані за кількома напрямками: земна поверхня, океани та узбережжя, моніторинг ризиків, гідрологія, геологія та кріосфера, атмосфера. Результати радіолокаційного знімання використовуються як вхідні дані для більшості зазначених напрямків досліджень.

Завантаження даних супутникового радіолокаційного знімання пропонується виконувати через геопортал Copernicus Open Access Hub. Цей ресурс вказується як основне джерело даних у більшості навчальних матеріалів. Проте варто зазначити, що платформа Copernicus Open Access Hub припинила свою роботу наприкінці жовтня 2023 р. Як і було анонсовано раніше, у січні 2023 р., сервіс Copernicus Open Access Hub продовжував працювати в повному обсязі до кінця червня 2023 р., після чого розпочалась фаза поступового скорочення, яка завершилась у вересні 2023 р.

Починаючи з 2015 року Copernicus Open Access Hub підтримував пряме завантаження супутникових даних Sentinel для виконання широкого спектра задач на основі даних дистанційного зондування. Сотні тисяч користувачів скористалися ресурсом протягом останнього десятиліття. Однак розвиток технологій потребував переходу на оновлену платформу. Тому сьогодні дані супутників Sentinel, разом з даними інших комерційних та державних супутників, повністю доступні на Copernicus Data Space

Ecosystem (<https://dataspace.copernicus.eu/>) після безкоштовної реєстрації. Миттєвий доступ до повних і завжди оновлених архівів даних спостереження Землі підтримується новим, більш інтуїтивно зрозумілим, інтерфейсом браузера Copernicus Browser.

Візуалізація знімків.

Одним зі способів попередньої перевірки відповідності даних користувацьким запитам є їхня візуалізація. Браузер Copernicus пропонує простий і швидкий спосіб візуалізації результатів, отриманих за пошуковим запитом. Немає потреби завантажувати повний знімок. Візуалізація дає змогу проводити аналіз попередньо визначених шарів, області інтересу або окремих пікселів безпосередньо в браузері. Такий підхід виявився зручним та ефективним для аналізу зворотного розсіювання на різних територіях при проектуванні та (або) розгортанні наземних кутових відбивачів радіолокаційного сигналу [8].

Браузер Copernicus та його функціонал для аналізу та візуалізації знімків з'явився як нова версія ресурсу Earth Observation Browser (EO Browser). Цей ресурс був запущений у січні 2017 р. і розроблявся за сприяння Європейської космічної агенції як простий у використанні та безкоштовний інструмент на основі браузера для доступу користувачів до десятків петабайт даних дистанційного зондування Землі. Відтоді EO Browser став одним з основних інструментів для вивчення супутникових даних. На початку 2023 р. ресурс приймав понад 150 тис. відвідувачів щомісяця, які обробляли близько 60 млн запитів [9]. Впродовж періоду його функціонування було створено велику кількість оглядів [10; 11; 12] та відеоматеріалів [13], які дозволили користувачам швидко опанувати роботу з ресурсом. EO Browser продовжує функціонувати і зараз. Проте розробники вважають, що немає потреби у двох платформах із подібним набором функцій. Тому планується об'єднати EO Browser та Copernicus Browser протягом наступних кількох років [9].

Завантаження знімків через графічний інтерфейс.

Завдяки браузеру Copernicus можна отримати доступ до актуального архіву даних радіолокаційних знімків (вкладка «Пошук»). Повне завантаження продуктів та широкі можливості опрацювання безпосередньо в браузері (функціонал якого, за словами розробників, постійно оновлюватиметься), робить його потужним інструментом не лише для любителів, але й для експертів у галузі дистанційного зондування.

Браузер Copernicus підтримує різні способи завантаження зображень та даних через графічний інтерфейс користувача (GUI – graphical user interface), включаючи швидкий перегляд зображень з низькою роздільною здатністю, аналітичні набори даних, анімацію часових рядів або завантаження неопрацьованих (сирих) знімків.

Завантаження знімків через текстовий інтерфейс.

Практика показала низьку ефективність, а подекуди неможливість, використання програмного забезпечення SNAP на операційній системі Windows для опрацювання супутникових радіолокаційних знімків. Тому більш поширеним для роботи з радарними знімками є використання операційної системи Linux.

Подібним чином це стосується завантаження супутникових знімків. Використання графічного типу інтерфейсу (напр. в Copernicus Browser) суттєво знижує швидкість завантаження даних, а також унеможливорює автоматизацію цього процесу. Альтернативним рішенням є завантаження даних радіолокаційного знімання через текстовий інтерфейс або інтерфейс командного рядка (Non GUI – Non graphical user interface). Це особливо актуально при завантаженні великих часових серій, які містять кілька десятків знімків (розмір файлу – до 8Gb).

Реалізацію такого підходу до завантаження файлів рекомендуємо виконувати шляхом формування файлу метаданих у форматі metalink. Metalink – це формат файлів на основі XML, який призначений для формування списку посилань на файли для завантаження за протоколами HTTP, FTP, BitTorrent та ін. Перевагами такого способу є висока швидкість завантаження даних, автоматичне виявлення та усунення помилок, відновлення завантаження після втрати мережевого з'єднання.

Широкі можливості для автоматизації завантаження архівних файлів (у т.ч. за допомогою файлу metalink) доступні на сайті Alaska Satellite Facility (<https://search.asf.alaska.edu>). Alaska Satellite Facility (ASF) – це активний архівний сервіс, який працює за сприяння Геофізичного інституту університету Аляски. ASF передає, опрацьовує, архівує та розповсюджує дані дистанційного зондування серед наукових користувачів у всьому світі. Важливою місією також є популяризація та сприяння у розвитку дистанційного зондування для підтримки національних і міжнародних наукових досліджень Землі, польових операцій і комерційних застосувань. Саме завдяки активній освітній діяльності, на сайті доступні навчальні матеріали для ознайомлення з архівом радіолокаційних знімків та автоматизації процесу їх завантаження. На рис. 1 представлено скриншот вебсторінки архіву ASF, у якій виконується пошук та завантаження радіолокаційних знімків супутника Sentinel-1.

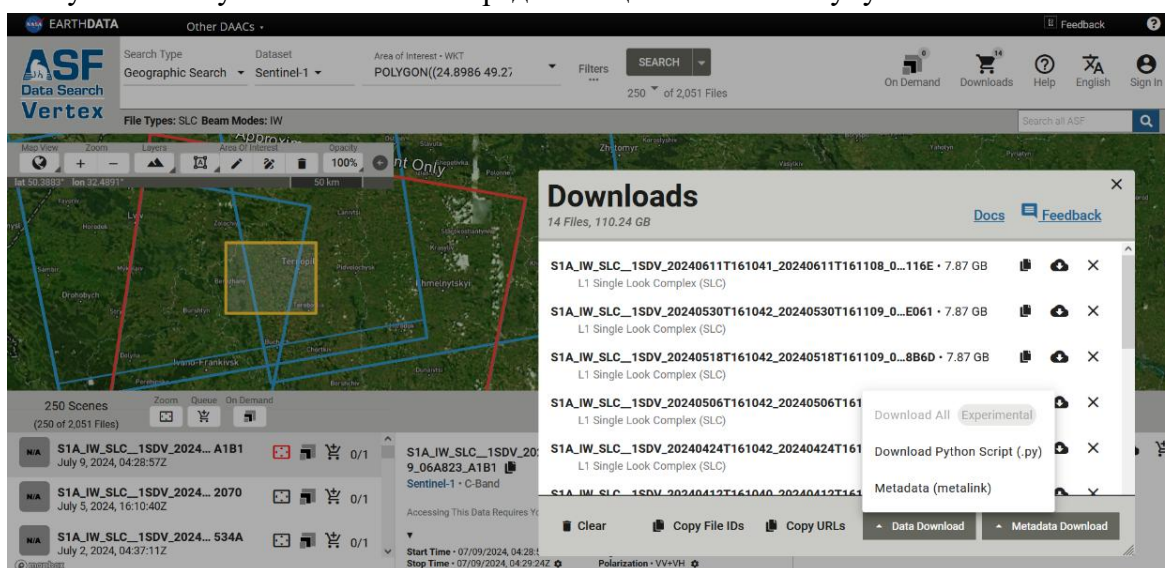


Рис. 1. Вікно архіву Alaska Satellite Facility для пошуку та завантаження результатів дистанційного зондування

Ресурс надає доступ до даних діючих та вже завершених супутникових та аерознімальних радіолокаційних місій. У табл. 1 представлено просторово-часові характеристики доступних радіолокаційних даних.

Крім цього, очікується, що ASF стане центром розповсюдження даних нової супутникової радіолокаційної місії NISAR. Це спільний проєкт США та Індії, який буде зосереджений на вивченні небезпечних процесів та глобальних змін навколишнього середовища. Радар супутника проводитиме знімання в L- та S-діапазоні (довжина хвилі 24 см та 9 см відповідно) з періодичністю 12 днів. Результати знімання будуть представлені у відкритому доступі.

Комерційні радіолокаційні знімки. Серед усіх діючих нині супутникових місій, які оснащені радаром із синтезованою апертурою, лише невелика частина розповсюджує дані у відкритому доступі. Більшість із них є комерційними, або працюють на забезпечення даними відповідні уряди та їхні військові потреби.

Завдяки очевидним перевагам радіолокаційних знімків у порівнянні з оптичними та зростанню запиту на розвідувальні дані зі супутників, продовжується стрімкий розвиток відповідних комерційних компаній, проєктів та стартапів. У табл. 2 представлено перелік успішних комерційних компаній, які експлуатують супутники та поширюють дані дистанційного зондування [14]. Серед них компанії, які відіграли важливу роль у підтримці оборони України: Capella Space, Umbra Space, ICEYE [15].

Таблиця 1 – Набори даних радіолокаційного знімання доступні в архіві Alaska Satellite Facility

№	Назва місії	Провайдер даних	Період експлуатації	Частотний діапазон	Частота знімання	Територія знімання
Супутникові сенсори						
1	ALOS PALSAR	Агентство аеро-космічних досліджень Японії (JAXA)	2006-2011 рр.	L-діапазон	46 днів	Північна і Південна Америки, та інші регіони світу
2	SENTINEL-1	Європейська космічна агенція (ESA)	2014 р. – по теперішній час	C-діапазон	6-12 днів	Вся планета
3	ERS-1 ERS-2	Європейська космічна агенція (ESA)	1991-2000 рр., 1995-2011 рр.	C-діапазон	35 днів	Територія від Аляски до Антарктиди (станція Мак-Мердо)
4	SMAP	NASA, США	Квітень – Серпень 2015 р.	L-діапазон	3 дні	Вся планета
5	SEASAT	NASA, США	1978 р.	L-діапазон	17 днів	Над північними океанами
6	RADARSAT-1	Канадське космічне агентство (CSA)	1995-2013 рр. (дані на ASF доступні до 2008 р.)	C-діапазон	24 дні	Вся планета
Аерознімальні сенсори						
7	AIRSAR	NASA, США	1988-2004 рр.	C-діапазон L-діапазон P-діапазон	-	Сполучені Штати Америки
8	UAVSAR	NASA, США	2008 р. – по теперішній час	L-діапазон	-	Північна, Центральна та Південна Америка, Гренландія та Ісландія

Джерело: розроблено автором.

За назвою компанії або супутникової місії можна віднайти електронну сторінку з контактною інформацією. Крім цього, компанії пропонують завантажити зразки радіолокаційних зображень для оцінки їхньої відповідності користувацьким запитам. Також надається інформація стосовно параметрів знімання та характеристик радара. Окремі компанії ведуть відкриту політику щодо вартості радіолокаційних зображень (AirBus: <https://radar.oneatlas.airbus.com>).

Таблиця 2 – Огляд діючих комерційних супутникових радіолокаційних місій

Назва компанії (супутникова місія)	Країна походження	Частотний діапазон	Максимальна роздільна здатність, м
AirBus (TerraSAR)	Німеччина	X-діапазон	0,72
e-Geos (CosmoSkyMed)	Італія	X-діапазон	1,0
Capella Space	США	X-діапазон	0,5
MDA (RCM)	Канада	C-діапазон	3,0
ICEYE	Фінляндія	X-діапазон	0,5
Umbra Space	США	X-діапазон	0,16
Synspective	Японія	X-діапазон	1,0
iQPS	Японія	X-діапазон	0,75
Spacety	Китай	C-діапазон	3,0
China's L-SAR 01	Китай	L-діапазон	3,0
Huanjing Juanjing	Китай	S-діапазон	20,0

Джерело: [14].

Важливо відзначити, що при формуванні запиту на комерційні радіолокаційні зображення, необхідно чітко вказувати напрямки подальшого застосування та методи опрацювання даних. Так не всі компанії можуть запропонувати часові серії радарних знімків для

ефективного використання інтерферометричного аналізу. Здебільшого це пов'язано з недостатньою точністю позиціонування супутника на орбіті, що приводить до збільшення базису на знімках до кількох сотень метрів.

Програма Європейського космічного агентства «Місії третьої сторони», або Third Party Missions (TPM) data – це програма сторонніх місій Європейського космічного агентства (ESA), що складається з понад 50 супутникових місій (близько 60 інструментів) з усього світу. Програма «Місії третьої сторони» діє вже понад 45 років і складається з серії супутників, спеціально орієнтованих на спостереження Землі. Через угоди з міжнародними публічними та комерційними організаціями, ESA сприяє доступності їхніх даних для науково-дослідних цілей через єдину програму для полегшення доступу. Мета програми полягає в тому, щоб запропонувати додаткові дані з широкого кола місій, які сприятимуть міжнародній співпраці та отриманню корисного досвіду для подальших розробок нових місій.

Відповідні супутникові місії, які розглядалися в підрозділі «Комерційні радіолокаційні знімки», залучені до програми «Місії третьої сторони». Тому в рамках проведення наукових досліджень (розробки додатків, прототипів і тестових проєктів) їхні дані можуть бути надані безкоштовно.

Передумовою доступу до колекції даних Програми є подання проєктної заявки, яка розглядається впродовж 4-6 тижнів. ESA підтримує якнайбільше високоякісних та інноваційних проєктів у межах загальної доступної квоти. Тому для кожного проєкту дозволяється лише обмежена кількість продуктів. Крім того, надання радіолокаційних знімків на вимогу (особливо високої роздільної здатності), підпадає під геообмеження. Наприклад надання даних TerraSAR-X підпадає під геообмеження через особливості угоди з постачальником – компанією Airbus. Перелік «Місій третьої сторони», а також покроковий спосіб формування заявки представлено в розробленому ESA документі [16].

З урахуванням широкого набору даних, який постійно зростає, може бути важко визначити, яка місія чи набір даних найкраще відповідають потребам користувача. Для попереднього перегляду та порівняння радіолокаційних даних було опубліковано зразки програми «Місії третьої сторони» [17].

Зразки для завантаження є у вільному доступі та містять вибрані приклади з наборів даних місії. Зразки впорядковані відповідно до структури продукту, що використовується постачальниками даних, точно імітуючи, чого очікувати від повної колекції. Усі зразки радіолокаційних даних були отримані на випробувальному полігоні в м. Нойштреліц, Німеччина. Отримання зображень на одному майданчику дозволяє порівнювати те, як різні супутники «бачать» ту саму територію, допомагаючи вирішувати, які місії та їхня роздільна здатність, тип продукту, візуальні діапазони, режими отримання та поляризації можуть відповідати користувацьким запитам. Зразки наборів даних доступні для завантаження на спеціальних сторінках відповідних місій, які містять список файлів для завантаження. Після вибору необхідної місії, за посиланням на повні колекції даних, можна дізнатися більше про їхні атрибути, включаючи часове та просторове покриття, і про те, як отримати доступ до продуктів.

Європейська служба моніторингу руху земної поверхні (EGMS). У відповідь на потреби користувачів, які були озвучені на форумі, проведеному в межах програми Copernicus, було створено Європейську службу моніторингу руху земної поверхні (EGMS - European Ground Motion Service). Цей ресурс являє собою передову технологію космічного дистанційного зондування, яка використовує дані радіолокаційної інтерферометрії, отримані з Sentinel-1, для виявлення та вимірювання рухів землі з міліметровою точністю. Тому EGMS є ще одним новим та унікальним джерелом даних, яке може бути використано як кінцевий продукт опрацювання радіолокаційних даних для аналізу природних та антропогенних геодинамічних проявів. Переглянути та завантажити дані ресурсу EGMS можна за посиланням <https://egms.land.copernicus.eu/>.

Відкриваючи нові шляхи та можливості використання даних супутникового спостереження Землі, EGMS надає безкоштовні та відкриті дані вимірювання руху землі лише на території країн Європейського союзу та ряду країн-партнерів Європейського екологічного агентства (рис. 2).



Рис. 2. Територія покриття послуги Європейської служби моніторингу руху земної поверхні (EGMS) [18]

На сьогодні Україна не входить до переліку країн, на території яких розповсюджуються дані сервісу. Проте в перспективі, ми очікуємо розширення зони діяльності сервісу над територією України, враховуючи рішучі кроки нашої держави на шляху євроінтеграції. На цьому етапі EGMS може бути використаний у межах представленої території для аналізу та інтерпретації даних, узгодження даних наземних геодезичних спостережень, порівняння моделей деформацій на інженерних об'єктах з подібними умовами або режимами експлуатації [19].

EGMS оновлюється щорічно і може використовуватися для широкого кола завдань, оскільки надає перевірені продукти, які проходять поглиблену незалежну перевірку. Міські, регіональні чи державні органи влади можуть використовувати його дані для моніторингу цілісності інфраструктурних та інженерних об'єктів (дамби, мости, залізниці і будівлі). Це дає змогу міським планувальникам приймати рішення на основі даних про те, де будувати нові об'єкти, оцінюючи ймовірність природних небезпек (зсуви або просідання). Дослідники можуть використовувати дані EGMS для вивчення наслідків зміни клімату, таких як танення вічної мерзлоти та опускання берегів. Завдяки відносно довгим часовим рядам записів зсуву рельєфу в усіх продуктах EGMS можна виявити часові характеристики та закономірності, такі як лінійне осідання, або специфічні явища, такі як прискорене осідання, пов'язане з підземними будівельними роботами. Доступність різних часових зміщень дозволяє користувачеві вирішувати конкретні проблеми, такі як дослідження геонебезпек шляхом відстеження еволюції деформації або прогнозування аналізу тенденцій на основі історії зміщень. Користувачі можуть посилатися на свої індивідуальні дослідження деформації або дослідження в EGMS, підтверджувати результати опрацювання або навіть порівнювати результати на місці з інформацією та продуктами EGMS.

European Ground Motion Service надає три основні продукти InSAR для візуалізації, аналізу та завантаження користувачами:

1. *Базовий продукт EGMS (Basic)* – це карти швидкості деформацій уздовж лінії візування супутника на висхідній і низхідній орбітах з анотованою геолокацією та показниками якості для кожної точки вимірювання. Лінія візування супутника це уявна лінія, яка з'єднує супутник із точкою на земній поверхні. Для визначення векторів деформацій, визначене значення потрібно попередньо спроектувати, щоб перейти до значення вертикального/горизонтального зміщення. Продукт надається як двовимірний продукт точок вимірювання із кольоровим кодуванням середньої швидкості. З кожною точкою пов'язаний графік часового ряду. Важливо врахувати, що значення швидкостей деформацій Базового продукту просторово прив'язані до віртуальної контрольної точки, часові ряди якої виводяться шляхом статистичного аналізу набору даних. Як наслідок, надані вимірювання мають значення лише в контексті загальної площі.

Створення Базового продукту EGMS є необхідним першим кроком до більш досконалого Каліброваного продукту.

2. *Калібрований продукт EGMS (Calibrated)* вважається основним продуктом EGMS, оскільки він задовольняє потреби більшості користувачів. Принципово він такий самий, як і базовий продукт, але вдосконалений завдяки тому, що значення зміщення враховують модель, отриману з даними часових рядів GNSS. Це перетворює вимірювання на основі радіолокаційних даних з відносних на абсолютні (відносно систему відліку з початком в центрі мас Землі). Як і Базовий продукт, Калібрований надається як два дискретні набори даних, один для висхідної орбіти супутника, а інший – для низхідної. Деякі ізольовані території можуть не мати даних GNSS. Для цих областей калібровані продукти виробляються шляхом гармонізації Базових продуктів відносно один одного.

3. *Спроектований продукт EGMS (Ortho)* використовує дискретні дані обох геометрій, надані продуктом Calibrated, для створення двох додаткових шарів: вертикальних зміщень, та горизонтальних зміщень в східно-західному напрямку. Обидва шари проєктуються на вузли сітки, розміром 100 м. Компоненти зміщення по вертикалі та схід-захід можна оцінити, використовуючи переваги попередньої інформації, отриманої з даних GNSS. Основною перевагою Спроектованих продуктів є наочність результатів, оскільки не потрібно враховувати геометрію збору даних. Такі декомпозиційні дані можуть виявитися цінними при розгляді явищ, які можуть передбачати планові зміщення, пов'язані з тектонікою або зсувами ґрунту.

EGMS пропонує різні освітні ресурси, зокрема тренінги, презентації та навчальні матеріали. Організація регулярних семінарів сприяє підвищенню обізнаності та навичок користувачів у роботі з даними сервісу. Онлайн-курси доступні на навчальних платформах. Вони охоплюють основи роботи з даними EGMS та їхній аналіз, використання програмного забезпечення. EGMS пропонує різноманітні презентації, які можна знайти на їхньому офіційному сайті або YouTube-каналі. Ці презентації включають: вступні презентації (загальний огляд сервісу, його можливостей та переваг для користувачів); тематичні презентації (конкретні аспекти використання даних EGMS, такі як аналіз ризиків, моніторинг природних катастроф та ін.); виступи на конференціях (записи виступів на наукових та професійних конференціях, де обговорюються досягнення та інновації у сфері моніторингу руху земної поверхні). Усі ці освітні компоненти допомагають краще зрозуміти та використовувати дані сервісу для наукових та практичних потреб.

Висновки.

1. На сьогодні онлайн-платформи EO Browser та Copernicus Browser є зручними, доступними та безкоштовними джерелами даних для завантаження, візуалізації та попереднього опрацювання супутникових радіолокаційних даних. Про це свідчить велика кількість користувацьких запитів та зареєстрованих користувачів. Високий степінь зацікавлення до ресурсів підтримується шляхом різнобічної популяризації серед освітніх та наукових спільнот. А доступ до навчальних і практичних матеріалів робить ці сервіси популярними не лише серед початківців, але й серед експертів у галузі дистанційного зондування Землі.

2. Великий обсяг даних радіолокаційного знімання, які необхідно завантажити та опрацювати для виконання навіть найпростішого проєкту, вимагає автоматизації цих процесів. Практика показала високу ефективність використання текстового інтерфейсу у порівнянні з графічним при завантаженні радіолокаційних знімків. Такий підхід дозволяє досягати високої швидкості передачі даних та автоматизувати процес отримання часових серій знімків при роботі на операційній системі Linux.

3. Комерційні супутникові радіолокаційні місії – це зручне джерело даних радіолокаційних знімків високої та надвисокої роздільної здатності. Проте висока вартість результатів знімання та подекуди відсутність можливості використання довгих часових серій знімків місії для інтерферометричного аналізу, потребує пошуку альтернативних рішень. Таким рішенням є використання даних програми Європейської космічної агенції «Місії третьої сторони» (Third Party missions). Завдяки цій програмі наукова спільнота має можливість отримати доступ до понад 50 супутникових місій на некомерційній основі.

4. Інтеграція України в європейський простір відкриє нові можливості не лише для економіки та оборони, але й надаватиме переваги повного використання сервісів програми Copernicus. Вважаємо, що розширення Європейської служби моніторингу руху земної поверхні (EGMS) на територію України, матиме взаємну ефективність. З одного боку, зросте інформативність та достовірність даних, представлених в EGMS, за рахунок поширення зони інтересу на схід та збільшення кількості перманентних GNSS станцій, що використовуються для верифікації результатів. З іншого боку, Україна отримає цінний інструмент для вирішення різноманітних геодезичних завдань на інженерних об'єктах і техногенно навантажених територіях.

Список використаних джерел

1. Zhu, X. X. A Review of Ten-Year Advances of Multi-Baseline SAR Interferometry Using TerraSAR-X Data / X. X. Zhu, Y. Wang, S. Montazeri, N. Ge // *Remote Sensing*. – 2018. – № 10. – P. 1374. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10091374>.
2. Torres, R. Overview of Copernicus SAR Space Component and its Evolution / R. Torres, M. Davidson // IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – Yokohama, Japan, 2019. – Pp. 5381-5384. DOI: 10.1109/IGARSS.2019.8899134.
3. SAR Analysis Ready Data and Tools for the Open Data Cube / A. Rosenqvist, B. D. Killough, A. M. Lubawy, J. C. Rattz // IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. – Waikoloa, HI, USA, 2020. – Pp. 3391-3394, DOI: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323781.
4. Making SAR Accessible: Education & Training in Preparation for Nisar / F. J. Meyer, P. A. Rosen, A. Flores, E. R. Anderson, E. A. Cherrington // 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. – Brussels, Belgium. – Pp. 6-9. DOI: 10.1109/IGARSS47720.2021.9554822.
5. Press Release [Electronic resource] / European Commission. – 2018, May 25. – Accessed mode: <https://www.copernicus.eu/sites/default/files/PRESS%20RELEASE%20-%20Copernicus%20Cooperation%20Arrangement%20with%20Ukraine%20-%2025%20May%202018.doc.pdf>.
6. Copernicus RUS Training Materials [Electronic resource] / EO Science For Society. – 2024, July 30. – Accessed mode: <https://eo4society.esa.int/resources/copernicus-rus-training-materials>.
7. Research user support Copernicus Training [Electronic resource] // YouTube. – 2024, July 30. – Accessed mode: <https://www.youtube.com/@ruscopernicustraining5404/videos>.
8. Kukhtar, D. Experience in deploying radar corner reflectors for InSAR monitoring / D. Kukhtar, V. Hlotov, O. Zayats // *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*. – 2023. – Vol. 98. – Pp. 42-49. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2023.98.042>.
9. Milcinski, G. EO Browser joins Copernicus Data Space Ecosystem – meet the Copernicus Browser [Electronic resource] / G. Milcinski, M. Devaraju // *Medium*. – 2023. – Access mode: <https://medium.com/sentinel-hub/eo-browser-joins-copernicus-data-space-ecosystem-meet-the-copernicus-browser-537a22d9cb>.
10. Кухтар, Д. В. Аналіз радіолокаційних знімків супутника Sentinel-1 за допомогою вебресурсу EO Browser / Д. В. Кухтар, // *Український журнал прикладної економіки та техніки*. – 2023. – Том 8. – № 4. – С. 258-263. DOI: <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2023-4-42>.

11. Застосування супутникових знімків у дослідницьких роботах учнів Малої академії наук України / С. О. Довгий, С. М. Бабійчук, Л. Я. Юрків, Т. Л. Кучма, О. В. Томченко, С. О. Данилов // Інформаційні технології і засоби навчання. – 2020. – № 80(6). – С. 21-38. DOI: 10.33407/itlt.v80i6.4053.
12. Бабійчук, С. М. (2021). Спеціалізовані курси з основ ДЗЗ для освітян системи Малої академії наук України / С. М. Бабійчук, О. В. Томченко // Наукові записи Малої академії наук України. – 2021. – № 1 (20). – С. 13-27.
13. Sentinel Hub [Electronic resource] // YouTube. – 2024, July 30. – Access mode: <https://www.youtube.com/@Sentinel-Hub/videos>.
14. SAR Satellite Companies [Electronic resource] // SAR Journal. – 2024, July 30. – Access mode: <https://syntheticapertureradar.com/sar-satellite-missions>.
15. Reflecting on Ukraine, New Space, and the Future of War from Space [Electronic resource] // SAR Journal. – 2024, July 10. – Access mode: <https://syntheticapertureradar.com/reflecting-on-ukraine-new-space-and-the-future-of-war-from-space>.
16. ESA's Earth Observation Third Party Missions (2023, December). Data Access Guide Current and Heritage Missions. European Space Agency [Electronic resource]. – Access mode: <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/Third-Party-Mission-Data-Access-Guide.pdf>.
17. Discover and download the Earth observation data [Electronic resource] // Earth Online. – 2024, July 30. – Access mode: <https://earth.esa.int/eogateway/search?text=third+party+mission&category=Data&instrument=imaging-radars>.
18. Capes, R. EGMS, Urban areas and infrastructure [Electronic resource] / R. Capes. – Access mode: https://land.copernicus.eu/en/events/egms-urban-areas-and-infrastructure/urban-and-infrastructure_v1-0_07jun2023.pdf/@download/file.
19. Tretyak, K. Assessing Reservoir Dam Stability Using C-band Permanent Scatterers InSAR / K. Tretyak, D. Kukhtar, T. Lipecki // *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*. – 2024. – Vol. 99. – Pp. 5-14. DOI: <https://doi.org/10.23939/istcgcap2024.99.005>.

References

1. Zhu, X.X., Wang, Y., Montazeri, S., Ge, N. (2018). A Review of Ten-Year Advances of Multi-Baseline SAR Interferometry Using TerraSAR-X Data. *Remote Sensing* 10, 1374. <https://doi.org/10.3390/rs10091374>.
2. Torres, R. and Davidson, M. (2019). Overview of Copernicus SAR Space Component and its Evolution. *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Yokohama, Japan. pp. 5381-5384. doi: 10.1109/IGARSS.2019.8899134.
3. Rosenqvist, A., Killough, B. D., Lubawy, A. M. and Ratz, J. C. (2020). SAR Analysis Ready Data and Tools for the Open Data Cube. *IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (pp. 3391-3394). Waikoloa, HI, USA. doi: 10.1109/IGARSS39084.2020.9323781.
4. Meyer, F.J., Rosen, P.A., Flores, A., Anderson, E.R., Cherrington, E. A. (2021). Making SAR Accessible: Education & Training in Preparation for Nisar. *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS* (pp. 6-9). Brussels, Belgium. doi: 10.1109/IGARSS47720.2021.9554822.
5. European Commission (2018, May 25). *Press Release*. <https://www.copernicus.eu/sites/default/files/PRESS%20RELEASE%20-%20Copernicus%20Cooperation%20Arrangement%20with%20Ukraine%20-%2025%20May%202018.doc.pdf>
6. *EO Science For Society* (2024, July 30). *Copernicus RUS Training Materials*. <https://eo4society.esa.int/resources/copernicus-rus-training-materials>.
7. *YouTube* (2024, July 30). *Research user support Copernicus Training*. <https://www.youtube.com/@ruscopernicustraining5404/videos>.
8. Kukhtar D., Hlotov V., Zayats O. (2023). Experience in deploying radar corner reflectors for InSAR monitoring. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 98, 42-49. <https://doi.org/10.23939/istcgcap2023.98.042>.
9. *Milcinski, G. and Devaraju, M. (2023). EO Browser joins Copernicus Data Space Ecosystem – meet the Copernicus Browser. Medium*. <https://medium.com/sentinel-hub/eo-browser-joins-copernicus-data-space-ecosystem-meet-the-copernicus-browser-537a22d9cb>.
10. Kukhtar, D. (2023). Analiz radiolokatsiynykh znmkiv suputnyka Sentinel-1 za dopomohoiu vebresursu EO Browser [Analysis of radar images of the Sentinel-1 satellite using the EO Browser web resource]. *Ukrainskyi zhurnal prykladnoi ekonomiky ta tekhniky – Ukrainian Journal of Applied Economics and Technology*, 8(4), 258-263. <https://doi.org/10.36887/2415-8453-2023-4-42>.

11. Dovhyj, S.O., Babijchuk, S.M., Yurkiv, L.Ya., Kuchma, T.L., Tomchenko, O.V., Danylov, S.O. (2020). Zastosuvannia suputnykovykh znimkiv u doslidnytskykh robotakh uchniv Maloi akademii nauk Ukrainy [Application of satellite images in research works of students of the Small Academy of Sciences of Ukraine]. *Informatsiini tekhnolohii i zasoby navchannia – Ukrainian journal of applied economics and technology*, (80(6)), 21-38. <https://doi.org/10.33407/itlt.v80i6.4053>.
12. Babijchuk, S.M., Tomchenko, O.V. (2021). Spetsializovani kursy z osnov DZZ dlia osvitiany systemy Maloi akademii nauk Ukrainy [Specialized courses on the basics of DZZ for educators of the system of the Small Academy of Sciences of Ukraine]. *Naukovi zapysy Maloi akademii nauk Ukrainy – Scientific records of the Small Academy of Sciences of Ukraine*, (1(20)), 13-27.
13. YouTube (2024, July 30). *Sentinel Hub*. <https://www.youtube.com/@Sentinel-Hub/videos>.
14. SAR Journal (2024, July 30). *SAR Satellite Companies*. <https://syntheticapertureradar.com/sar-satellite-missions>.
15. SAR Journal (2024, July 10). *Reflecting on Ukraine, New Space, and the Future of War from Space*. <https://syntheticapertureradar.com/reflecting-on-ukraine-new-space-and-the-future-of-war-from-space>.
16. ESA's Earth Observation Third Party Missions (2023, December). Data Access Guide Current and Heritage Missions. *European Space Agency*. <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/Third-Party-Mission-Data-Access-Guide.pdf>.
17. Earth Online (2024, July 30). Discover and download the Earth observation data. <https://earth.esa.int/eogateway/search?text=third+party+mission&category=Data&instrument=imaging-radars>.
18. Capes, R. (2023). EGMS, Urban areas and infrastructure. https://land.copernicus.eu/en/events/egms-urban-areas-and-infrastructure/urban-and-infrastructure_v1-0_07jun2023.pdf/@@download/file.
19. Tretyak K., Kukhtar D., Lipecki, T. (2024). Assessing Reservoir Dam Stability Using C-band Permanent Scatterers InSAR. *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 99, 5-14. <https://doi.org/10.23939/istcgcap2024.99.005>.

Отримано 01.10.24

UDC 528.8.044.2

Denys Kukhtar

PhD in Technical Sciences, Department of Geodesy and Land Management
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
(Ivano-Frankivsk, Ukraine)

E-mail: denys.kukhtar@nung.edu.ua. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2839-4318>

DATA SOURCES OF SATELLITE RADAR IMAGING

In the past decade, there has been a growing scientific interest in the use of satellite radar data. However, representatives of the scientific community in Ukraine frequently inquire about the methods and means of accessing satellite radar data to address various scientific, educational, and applied challenges. This article provides a comprehensive overview of the knowledge acquired regarding the use of various sources of satellite radar imagery for monitoring natural and anthropogenic geodynamic phenomena.

The aim of this article is to systematize the accumulated experience in searching for and utilizing radar images. It offers an in-depth review of radar data sources that can be employed for processing multi-temporal series of satellite images, creating differential interferograms from image pairs, as well as analyzing and visualizing individual Synthetic Aperture Radar (SAR) images. Detailed resources for downloading and visualizing radar data are also reviewed. The article lists freely available satellite missions accessible through the Alaska Satellite Facility's active archive center. The article also provides an overview of commercial radar missions and their acquisition features. Additionally, it explores the potential for expanding the range of radar image sources available for research under the European Space Agency's Third Party Missions program. The prospects of extending the European Ground Motion Service (EGMS) coverage to include the territory of Ukraine are analyzed.

The presented information is intended to be a valuable resource for scientists, educators, and pedagogical professionals who rely on remote sensing data, particularly radar images, for educational and research purposes. By systematizing the available sources and methods for accessing satellite radar data, this article aims to facilitate more effective utilization of these resources in various scientific and practical contexts.

Keywords: SAR; commercial images; satellite missions; metalink; EO Browser; Copernicus Browser; ASF; EGMS.