УДК 528.88
DOI: http://doi.org/10.17721/1728-2713.91.13

Є. Углицьких, асп.,
E-mail: evgeniyuglitskih1993@gmail.com;
С. Вижва, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vyzhvas@gmail.com;
О. Іванік, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: om.ivanik@gmail.com;
Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
ННІ "Інститут геології", вул. Васильківська, 90, м. Київ, 03022, Україна

МОНІТОРИНГ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЗМІЩЕНЬ ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ ТЕРИТОРІЇ ЗАКАРПАТТЯ ЗА ДАНИМИ РАДАРНОЇ ІНТЕРФЕРОМЕТРІЇ

(Представлено членом редакційної колегії д-ром геол. наук, проф. В.А. Михайловим)

Представлено результати моніторингу деформацій земної поверхні території Закарпаття, виконаного за допомогою методу радарної інтерферометрії. Метод радарної інтерферометрії дозволяє здійснювати моніторинг зміщень земної поверхні в режимі реального часу і оперативно отримувати актуальні дані. На основі проведених досліджень Карпатського модельного полігону було опрацьовано 26 пар інтерферограм за період 2016–2018 рр. і побудовано загальну карту вертикальних зміщень земної поверхні полігону. Виконано ранжування території на три зони згідно з показниками вертикальних зміщень земної поверхні. Підтверджено, що використання даних інтерферометрії є ефективним для детального аналізу режиму та динаміки небезпечних геологічних процесів, зокрема для розвитку зсувів. Дані зйомки мають практичну цінність і за хорошої розрізненості та відповідного алгоритму обробки дають обґрунтовані результати, які в поєднанні з даними літолого-стратиграфічних, геоморфологічних і структурно-тектонічних досліджень можуть бути використані для прогнозування небезпечних геологічних процесів і мінімізації їхнього негативного впливу на природно-техногенні системи.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі, інтерферометрія, зміщення земної поверхні, небезпечні геологічні процеси

Вступ. У зв'язку з постійним зростанням кількості надзвичайних ситуацій, спричинених природними і техногенними процесами, актуальною є розробка та широке застосування нових методів і технологій моніторингу та прогнозування таких небезпечних геологічних процесів, як зсуви, обвали, селеві явища та ін. Для вирішення цих завдань використовуються різні методи і підходи, ефективність яких визначається як особливостями перебігу цих процесів, так і апаратурними та програмними можливостями різних засобів. На сьогодні для вирішення завдань дослідження режиму та динаміки небезпечних явищ, а також оцінки їхнього впливу на техногенні об'єкти різного призначення ефективним є використання космічних методів дистанційного зондування, перш за все радіолокаційних методів, та їхнє поєднання з оптичними методами. Використання з цією метою методів радарної інтерферометрії є достатньо поширеним *(Hooper et al., 2012)*.

Супутникова радарна інтерферометрія – метод вимірювань, що використовує ефект інтерференції електромагнітних хвиль *(Bawden et al., 2001)*. Основна ідея методу полягає у формуванні інтерферограми, яка являє собою результат комбінації двох радіолокаційних зображень однієї й тієї ж території (рис. 1), що містять інформацію про амплітуду і фазу сигналу, і отриманих ідентичними радарами з близько розташованих точок орбіти *(Ashkenas, 1950; Hanssen, 2001)*. Інтерферометричний радар із синтезованою апертурою (Інсар) використовує різницю фаз між двома комплексами радарних SAR спостережень, виконаних із кількох різних положень датчиків.

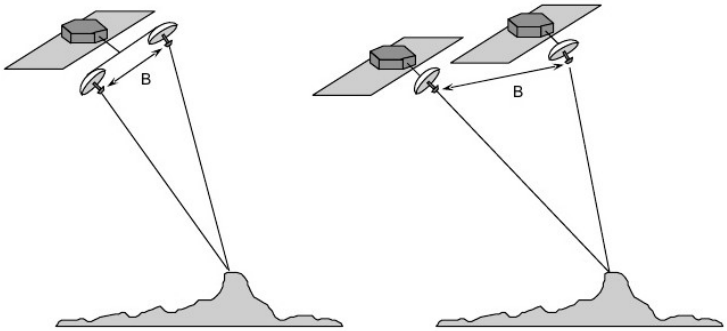

Рис. 1. Принцип роботи радарної інтерферометрії: на першому етапі радарні супутники формують знімок поверхні, на другому етапі через деякий час вони роблять повторний знімок з іншою відстанню між ними (B). Інтерферограма, яка формується на основі цих даних і є показником змін, що зазнала земна поверхня за час дослідження (за https://volcanoes.usgs.gov/volcanoes/yellowstone/monitoring.html)

Використання радіохвиль дозволяє радарним системам отримати інформацію про положення земної поверхні через хмарність і в темний час доби, що, наприклад, робить можливим постійний моніторинг льодової обстановки під час полярної ночі (*Lu et al., 2002)*. Однак ще більш істотно те, що радари здатні вимірювати не тільки амплітуду, але й точний момент коливань – фазу відображених хвиль. Сигнал SAR містить амплітудну і фазову інформацію. Амплітуда – це сила відгуку радара, а фаза являє собою частку одного повного циклу синусоїдальної хвилі (одна довжина хвилі SAR). Фаза зображення SAR визначається в основному відстанню між супутниковою антеною і наземними об'єктами *(Breining, 2007; Chevalerias et al., 1957)*. Об'єднавши фази цих двох зображень після кореєстрації, інтерферограма може бути згенерована фазою, пов'язаною з топографією місцевості.

Радарна інтерферометрія має на меті аналіз вертикальних зміщень земної поверхні та застосовується переважно для:

- створення цифрових моделей рельєфу, зокрема високоточних (із просторовою роздільною здатністю близько метра і точністю визначення висоти близько 1–2 метрів);

© Углицьких Є., Вижва С., Іванік О., 2020

• вимірювання деформацій відбивної поверхні з точністю до порядка довжини хвиль радара, зокрема:

▪ моніторинг наслідків землетрусів;

▪ моніторинг передумов і наслідків вулканічної активності;

▪ виявлення просідання, деформації споруд;

▪ моніторинг динаміки рівня моря;

▪ моніторинг гравітаційних геологічних процесів;

▪ високоточні вимірювання затримок радіосигналів в атмосфері (безпосередньо пов'язані з розподілом в атмосфері водяної пари);

▪ моніторинг наслідків сільськогосподарської діяльності та ін. *(Massonnet, Feigl, 1998; Rucci et al., 2012).*

Моніторинг на основі радіолокаційної інтерферометрії відносно дешевий, не вимагає установки спеціального обладнання і проведення польових робіт, а використання архівних знімків дозволяє досліджувати поведінку об'єктів до і після катастрофічних подій. Цим метод інтерферометрії вигідно відрізняється, наприклад, від методів моніторингу із застосуванням глобальних навігаційних супутникових систем (ГЛОНАСС і GPS). Водночас для отримання надійних результатів за методом інтерферометрії необхідні контроль і калібрування із застосуванням наземних даних *(Monnier, 2003; Paschotta, 2012).*

Головною метою даних досліджень є аналіз режиму і динаміки небезпечних геологічних процесів Карпатського модельного полігону за даними радарних інтерферометричних досліджень та оцінка їхнього впливу на інфраструктурні об'єкти.

Загальна характеристика впливу небезпечних геологічних процесів на інфраструктурні об'єкти в межах Карпатського модельного полігону. Українські Карпати є одним із регіонів розвитку несприятливих стихійних явищ, де активізація небезпечних геологічних процесів та їхній вплив на численні техногенні об'єкти створює низку економічних та екологічних проблем. Так, за даними Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи тільки в межах Закарпатської області щорічно виникає значна кількість надзвичайних ситуацій, зумовлених природними чинниками. Серед них переважають небезпечні геологічні процеси. Сума збитків, завданих цими процесами об'єктам господарювання, становить десятки мільйонів гривень на рік. Тому з'ясування природи небезпечних геологічних явищ, оцінка їхніх просторово-часових закономірностей є нагальною проблемою і потребує глибоких комплексних аналітичних досліджень.

Вивчення та аналіз різноманітних факторів формування негативних явищ у Карпатах здійснювались як численними виробничими та науковими установами, так і окремими дослідниками. У результаті створено величезну інформаційну базу з поширення цих явищ та їхніх характеристик, насамперед зсувних, селевих процесів, річкової ерозії, обвалів тощо *(Багрій та ін., 2004; Демчишин, 2004; Климчук та ін., 2008; Ivanik et al., 2019).* Більшість досліджень має регіональний характер, метою яких є аналіз дрібномасштабних геолого-геоморфологічних матеріалів і створення карт поширення екзогенних процесів. Проведення ж детальних спеціалізованих досліджень з вивчення небезпечних геологічних процесів на конкретних полігонах демонструє необхідність і доцільність детального комплексного аналізу геологічних і геоморфологічних факторів їхнього формування, що значно підвищує об'єктивність як їхньої загальної оцінки, так і прогнозу в межах певних територій. При цьому застосування методів дистанційного зондування, зокрема методів радарної інтерферометрії, дає можливість детального аналізу режиму та динаміки геологічних процесів з можливістю кількісної характеристики динамічних змін протягом певного проміжку часу.

Територія дослідженого полігону в адміністративному відношенні займає частину Свалявського та Воловецького районів Закарпатської області та обмежена меридіанами 22º55' та 23º15' сх. д. та паралелями 48º30' та 48º50' пн. ш. (рис. 2). Цей полігон займає площу 804,3 км^2.

У межах полігону характерною є високий ступінь техногенного навантаження на геологічне середовище, що створює передумови для інтенсифікації небезпечних геологічних процесів і динамічного розвитку природно-технічних систем (ПТС). Високу концентрацію має сітка наземних і підземних комунікацій. Зокрема, у межах полігону проходить магістральна лінія Львівської та Південно-Західної залізниці Москва–Київ–Львів–Чоп, що характеризується регулярністю руху, високою швидкістю перевезень, великою пропускною і провізною спроможністю та є однією з найбільш вантажонапружених ліній цього регіону *(Вялов та ін., 1989)*. Значне поширення у межах району мають також магістральні автомобільні шляхи, зокрема автомобільний шлях міжнародного значення Київ–Чоп, що збігається із частиною Європейського автомобільного маршруту Е50, а також автомобільні дороги місцевого значення. Однією із функціонуючих транспортних ПТС є сітка магістральних газо- та нафтопроводів, що характеризується складними умовами прокладання і, відповідно, проблемним характером експлуатації, періодичним виникненням катастрофічних ситуацій та аварій, зумовлених саме природними чинниками. Ураховуючи зручне географічне положення Закарпатської області, через її територію проходять магістральні газопроводи "Братерство", "Союз", "Прогрес" та Уренгой–Помари–Ужгород загальною довжиною 1177 км, через які транспортується природний газ із Росії у 12 країн Європи, а також постачається газ для потреб споживачів області. По території Свалявського та Воловецького районів проходить також транзитний нафтопровід "Дружба" (його протяжність у Закарпатській області становить 254 км), що є найбільшим у світі. Таким чином, складна газо- та нафтотранспортна система створює ефект додаткового навантаження на геологічне середовище, що знижує надійність роботи трубопроводів і може призвести до складних екологічних наслідків. Даний полігон характеризується значною привабливістю і з рекреаційної точки зору. В його межах є велика кількість джерел мінеральних вод (близько 100 мінеральних джерел – майже третина з усіх відомих на Закарпатті), наявність яких послужила базою для побудови багатьох оздоровчих закладів. У зв'язку з цим виникнення будь-яких катастрофічних ситуацій з негативними наслідками погіршує рекреаційний потенціал цієї території й потребує обов'язкової розробки превентивних заходів щодо унеможливлення катастрофічного прояву небезпечних геологічних процесів.

У межах дослідженого регіону зафіксовано понад 200 зсувів, 35 з яких відбулися або були активізовані в 1998 та 2001 рр. унаслідок потужних паводків. Решта зсувів відбулася протягом останніх 30 років і на сьогодні вони є стабілізованими. У результаті було пошкоджено та частково зруйновано будинки, господарські будівлі, автошляхи, мости, трубопроводи. Найбільші пошкодження будинків та автошляхів спостерігалися в населених пунктах Задільське, Підполоззя, Верхні Ворота, Воловець, Абранка Воловецького району та Солочин, Голубине, Поляна, Рудникова Гута Свалявського району. Інтенсивний прояв селевих явищ спостерігався у с. Абранка та інших населених пунктах, дія яких спричинила численні пошкодження господарських будівель, руйнування мостів і призвела до економічних збитків. Повсюдно в межах русл річок і струмків спостерігаються процеси бічної ерозії, що порушує стійкість схилів, а також незначні обвали та осипи.

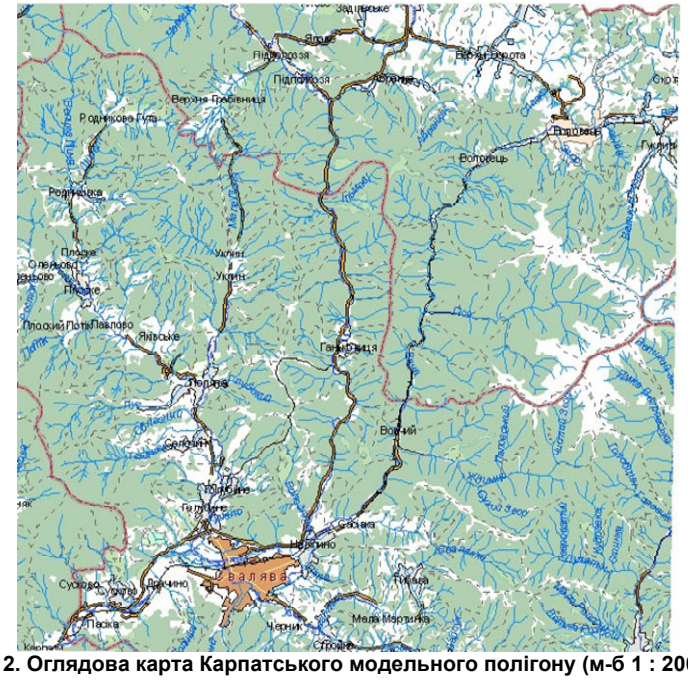

Рис 2. Оглядова карта Карпатського модельного полігону (м-б 1 : 200000)

З геологічної позиції район входить до складу Альпійської геосинкліналі. За сучасним районуванням Українських Карпат територія, що вивчалася, розміщена в межах Східних Карпат і Закарпатської западини. Цей полігон охоплює Дуклянську, Магурську, Поркулецьку структурно-фаціальні зони (Зовнішні Карпати) та Пенінську зону (Внутрішні Карпати), що є одиницями-покривами регіонального простеження з мінливою конфігурацією та різними амплітудами насуву. У геологічній будові території беруть участь утворення двох структурних поверхів. Відклади нижнього структурного поверху представлені карбонатно-теригенними та теригенними мезозой-кайнозойськими формаціями (переважно флішевою). Вони інтенсивно дислоковані й утворюють пакет покривних структур. Основними параметрами літолого-фаціальних відмінностей є речовинний склад порід, їхня ритмічність, забарвлення, вапнистість, кременистість, ступінь збагачення органікою, текстурні особливості, наявність викопних організмів, маркуючих горизонтів *(Іванюта та Яковлєв, 2014; Рудько та Осиюк, 2012).* Саме ці характеристики флішевих утворень є визначальними при виникненні різноманітних екзогенних процесів, оскільки різні типи флішу мають значні відмінності у фізико-механічних властивостях порід і відповідно різний ступінь реагування на деструктивні процеси. Відклади верхнього структурного поверху спостерігаються лише на крайньому заході полігону і являють собою неоген-четвертинні осадові, вулканогенні та вулканоміктові утворення, що залягають переважно горизонтально. Геоморфологічна будова полігону є типовою для гірських областей з переважанням середньо- та низькогірського ерозійно-тектонічного та денудаційного рельєфу, значною густиною горизонтального розчленування (до 2,5 км/км^2), глибиною вертикального розчленування (до 120 м) і крутістю схилів (до 35–40º), що створює "енергію" для розвитку різноманітних екзогенних процесів.

Значний вплив на створення передумов для інтенсифікації несприятливих геологічних явищ Українських Карпат здійснюють новітні та сучасні рухи земної кори, які мають чітку зональність прояву в рельєфі. Неотектонічні рухи виокремлюються на всій території й загалом спостерігаються в постійній тенденції до підняття Карпат та опускання Закарпатського прогину. Для четвертинного періоду ця тенденція проявляється у формуванні переважно цокольних терас, рівень яких прогресивно зростає від низовини до головного вододілу Карпат, та в утворенні потужних чопських і минайських відкладів у Закарпатському прогині *(Максимчук та ін., 2005; Палиенко, 1992).*

Процеси підняття і опускання відносні й диференційовані за системою розривів загальнокарпатського простягання, які збігаються з межами блоків, скиб, лусок. Показник сумарних амплітуд неотектонічних рухів має змінні значення у різних структурно-фаціальних зонах. Найбільші показники фіксуються в межах Поркулецького покриву (до 1800–2000 м). Дуклянський покрив характеризується значеннями 1200–1600 м, Кросненська зона – 800–1200 м. Район досліджень належить до зони перервно-безперервних диференційованих підняттів і горизонтальних рухів земної кори (з підзоною складчасто-брилових рухів в умовах інтенсивного горизонтального стиснення і спряжених інтенсивних підняттів), а також до зони коливальних (знакозмінних рухів з підзоною вулканотектонічних процесів і спряжених з ними рухів). Найактивніші неотектонічні підняття і горизонтальні рухи земної кори фіксуються в першій зоні. Середні градієнти швидкостей неотектонічних рухів у межах першої зони становлять $2\cdot10^{-4}$ – $7\cdot10^{-4}$ см/км/рік.

Сучасні вертикальні тектонічні рухи супроводжуються формуванням вузьких V-подібних долин гірських річок зі скелястим ложем, висячими долинами приток. Так, на території досліджень у притоках р. Пині спостерігаються чітко виражені терасоподібні уступи, що фіксують етапи тектонічної активізації. Рельєфні ознаки сучасних тектонічних підняттів підтверджуються GPS-спостереженнями перманентних станцій Європейського блока мережі ITRF (Міжнародна земна референтна система), за допомогою яких обчислено горизонтальні та вертикальні деформації земної поверхні (*Кузьменко та ін., 2005*). Швидкості вертикальних рухів у межах вивченої території сягають до +5 мм/рік. Таким чином, постійна активізація тектонічних рухів земної кори зумовлює формування потенційної енергії виникнення водних, гравітаційних і водно-гравітаційних процесів, що в поєднанні з літологічними та геоморфологічними факторами спричиняють посилення та інтенсифікацію зсувних, обвальних, осипних та ерозійних процесів. Додаткові дослідження вертикальних зміщень земної поверхні в межах локальних природних і техногенних об'єктів

забезпечуються застосуванням методів супутникової інтерферометрії, що дає можливість представлення кількісних показників цих параметрів у межах окремих ділянок і територій.

Аналіз вертикальних зміщень земної поверхні в межах Карпатського модельного полігону. Для досліджень вертикальних зміщень земної поверхні в межах Карпатського модельного полігону використано супутникові знімки Sentinel-1 за період з 26 вересня 2016 р. до 4 листопада 2018 р. Європейський супутник дистанційного зондування Землі Sentinel-1 забезпечує виконання програми глобального моніторингу навколишнього середовища і безпеки "Copernicus" (попередня назва GMES). На борту супутника встановлено радіолокаційну станцію (РЛС) із синтезованою апертурою C-SAR (розроблена компанією "Astrium"), яка забезпечує надходження космічних знімків за будь-якої погоди. Зйомка виконується в С-діапазоні (довжина хвилі 6 см). Після обробки даних в деяких режимах просторова роздільна здатність досягає 1 х 1 м. Група знімків Sentinel-1 хоч і має не найкраще розрізнення, але постійно перебуває у вільному доступі, знімки можна отримувати кожні шість днів.

Моніторинг вертикальних зміщень земної поверхні виконується в декілька етапів:

- *Підбір радіолокаційних даних, придатних для інтерферометрії.* На першому етапі проводиться формування каталогу знімків (щомісяця). Перевага надається знімкам у теплу пору року, оскільки в холодні місяці наявність снігу може спричинити чималу похибку. Виконується завантаження файлів орбіти для космознімків, імпорт і, за необхідності, фокусування голограм нульового рівня;
- *Виконання кореєстрації.* Для інтерферометричної обробки два або більше зображення (знімка) мають бути кореєстровані в стек. Виконується кореляція амплітуд знімків і кореєстрація за порогом когерентності;
- *Формування загальної інтерферограми.* Комбінація інтерференційних ліній являє собою повний цикл 2π. Кольорові окантовки з'являються на інтерферограмі як цикли довільних кольорів, причому кожен цикл становить половину довжини хвилі супутника. Чим ближче лінії одна до одної, тим більше зміщення відбулось у цьому районі. Для отримання інтерферограми використовуються спеціальні цифрові моделі рельєфу (SRTM і DEM);
- *Виділення топографічної фази.* При формуванні інтерферограми враховується фаза рельєфу території (SRTM). Для більш точного формування карти необхідно її видалити. Інтерферограма може бути трохи сплющена шляхом видалення топографічної фази.
- *Фільтрація і розгортка фази.* Щоб мати можливість правильно розгортати фази, виконується фільтрація інтерферограми від фазових шумів. Перед розгортанням фази виділяється певна територія. Модуль реалізує розгортку фази шляхом видалення розривів, які перевищують значення в 2π;
- *Формування карти деформацій.* Фінальний результат обробки, що являє собою карту вертикальних зміщень земної поверхні території дослідження *(Углицьких та ін., 2016).*

У результаті виконання зазначених операцій було побудовано загальну карту вертикальних зміщень земної поверхні Карпатського модельного полігону та виконано ранжування території на три зони згідно з показниками вертикальних зміщень земної поверхні (рис. 3). Зона 1 характеризується максимальними підняттями – 3–4 см за 2 роки. Ця зона розташована на півночі досліджуваної території в межах Свалявського району. Вона займає близько 10 % регіону. Зона 2 характеризується значеннями вертикальних зміщень 1–2 см за 2 роки. Вона займає близько 70 % території, включаючи в себе міста Мукачеве, Іршава, Межигір'я, Поляна і Голятин. Зона 3 займає 20 % досліджуваної території та включає в себе ділянки з опусканням території до 0,3–5,5 см за 2 роки (рис. 4). Тренд опускань є сталим, лише з невеликими сезонними підняттями, що, імовірно, є наслідком природних гідрометеорологічних явищ. Слід відзначити окремі локальні ділянки опускання поверхні, пов'язані з трасами трубопроводів. Таким чином, регіональна карта зміщень земної поверхні в межах Карпатського модельного полігону дає можливість зафіксувати диференційований характер сучасних деформацій. Однак найбільшу ефективність метод радарної інтерферометрії має при великомасштабних дослідженнях природно-техногенних систем та аналізі режиму і динаміки небезпечних геологічних процесів у межах окремих об'єктів.

Так, при аналізі зсувонебезпечної ділянки в межах с. Голубине виявлено таку динаміку зсувного процесу (рис. 4). З огляду на аналіз зсувонебезпечної ділянки можна констатувати, що вертикальне зміщення поверхні є сталим протягом трьох років, що спостерігається і на всій території Карпатського полігону, із середнім просіданням близько 2 см на рік. Зауважимо, якщо використовувати супутники з більшою роздільною здатністю, похибку досліджень можна звести до мінімуму й отримати більш точні результати.

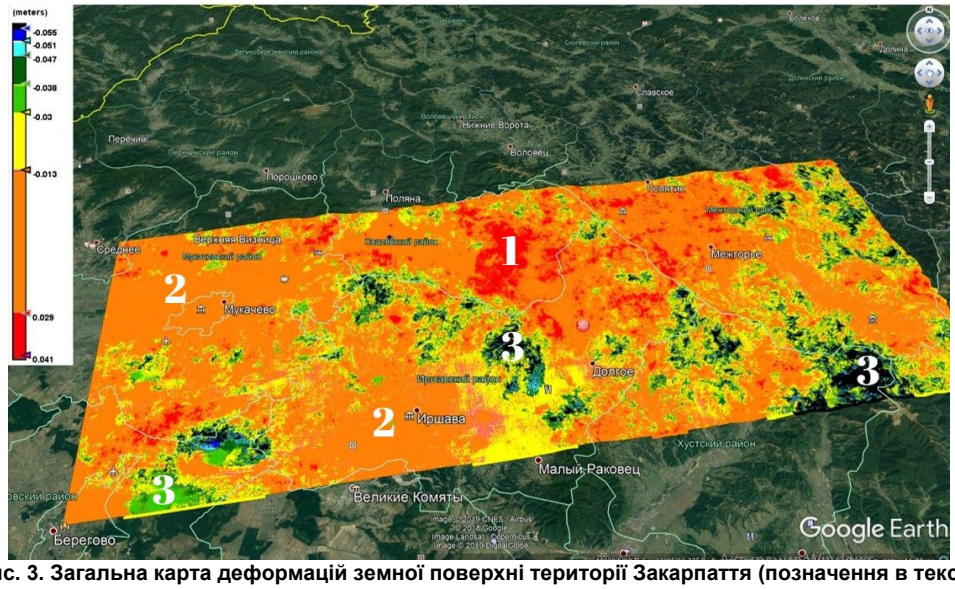

Рис. 3. Загальна карта деформацій земної поверхні території Закарпаття (позначення в тексті)

Рис. 4. Графік вертикальних зміщень зсувонебезпечної ділянки в межах с. Голубине (48°34'49.2"N 22°58'13.7"E)

Наслідком зсувних процесів є пошкодження будинків, господарських будівель і ґрунтової дороги в населеному пункті (рис. 5). Активізація зсуву відбулася в березні 2001 р., однак щорічний моніторинг стану зсувонебезпечного схилу фіксує значні зміни його морфології, зокрема формування нових тріщин відриву та зростання амплітуди вже існуючих (понад 30 см на рік). Морфологічно зсуви належать до складно побудованих, для них характерні нечітко виражені основні стінки відриву, що мають каскадний характер. Сформовано зсуви на схилах із крутизною від 30 до 35°. У верхній частині схилу в місцях розташування будинків і дороги спостерігаються видовжені уступи в рельєфі.

Рис. 5. Зсув у межах північно-східної околиці с. Голубине, Свалявський р-н Закарпатської обл. (долина струмка Гучало)

Ділянка дослідження розташована в межах Лисичевської підзони Поркулецької структурно-фаціальної зони. У численних ділянках струмка Гучало спостерігаються зони інтенсивного дроблення породних комплексів, що характеризуються неоднорідною будовою, наявністю численних різнопорядкових розривних порушень різного кінематичного типу. Проведені дослідження підтверджують наявність деструктивної зони, що характеризується тектонізованістю флішоїдних товщ і наявністю слабкозцементованих відкладів, яка за умови надмірного зволоження є провідним чинником формування та активізації зсувів. Слід зазначити, що інтенсивна бічна ерозія р. Пиня посилює та інтенсифікує зсувні процеси і призводить до зміни загальних морфологічних ознак схилів, створюючи при цьому умови розвантаження схилу.

Висновки. Метод радарної інтерферометрії дозволяє здійснювати моніторинг зміщень земної поверхні в режимі реального часу й оперативно отримувати актуальні дані. У результаті проведених досліджень Карпатського модельного полігону було опрацьовано 26 пар інтерферограм за період 2016–2018 рр. Визначено диференційовані значення деформації земної поверхні за цей період. Підтверджено, що використання даних інтерферометрії є ефективним для детального аналізу режиму та динаміки небезпечних геологічних процесів. Однією із сильних сторін використання супутникових інтерферометричних даних є можливість картування потенційних зсувів у гірських районах. Дані зйомки мають прикладну цінність і при хорошій розрізненості та відповідному алгоритмі обробки дають обґрунтовані результати. Оцінка динаміки розвитку зсувів у межах зсувонебезпечних територій за даними супутникової інтерферометрії в поєднанні з даними літолого-стратиграфічних, геоморфологічних і структурно-тектонічних досліджень дає надійні результати щодо прогнозування розвитку цих процесів і мінімізації їхнього негативного впливу на природно-техногенні системи.

Список використаних джерел

Багрій, І.Д., Блінов, П.В., Гожик, П.Ф., Кожем'якін, В.П. (2004). Активізація небезпечних геологічних явищ у Закарпатті як наслідок екстремальних паводків. Київ: Інститут геологічних наук НАН України.

Вялов, О.С., Андреева-Григорович, А.С., Гавура, С.П. и др. (1989). Региональная схема стратиграфии меловых отложений Украинских Карпат. *Палеонтологический сборник*, 26, 71–72.

Демчишин, М.Г. (2004). Техногенні впливи на геологічне середовище території України. Київ : Гнозіс.

Іванюта, С.П., Яковлєв, Є.О. (2014). Регіональна оцінка рівня техногенного навантаження в Україні. *Вісник Вінницького політехнічного інституту,* 6, 38–45.

Климчук, Л.М., Блінов, П.В., Величко, В.Ф. та ін. (2008). Сучасні інженерно-геологічні умови України як складова безпеки життєдіяльності. Київ : ВПЦ "Експрес".

Кузьменко, Е.Д., Безсмертий, А.Ф., Вдовина, О.П. та ін. (2009). Дослідження зсувних процесів геофізичними методами. Івано-Франківськ : ІФНТУНГ.

Максимчук, В.Ю., Кузнєцова, В.Г., Вербицький, Т.З. та ін. (2005). Дослідження сучасної геодинаміки Українських Карпат. Київ : Наук. думка.

Палиенко, В.П. (1992). Новейшая геодинамика и ее отражение в рельефе Украины. Киев : Наук. дума.

Рудько, Г.И., Осиюк, В.А. (2012). Инженерная геодинамика Украины и Молдовы (оползневые геосистемы). Черновцы : Букрек.

Углицьких, Є.К., Зацерковний, В.І., Тішаєв, І.В. (2016). Моніторинг деформацій вулканічних структур на основі дистанційних зондувань Землі. *Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики*, 13, 4–8.

Ashkenas, H.I. (1950). The design and construction of a Mach-Zehnder interferometer for use with the GALCIT Transonic Wind Tunnel. *Engineer's thesis. California Institute of Technology,* 121–122.

Bawden, G.W., Stein, R.S., Hudnut, K.W. (2001). Tectonic contraction across Los Angeles after removal of groundwater pumping effects. *Nature*, 412, 812–815.

Breining, G. (2007). Super Volcano: The Ticking Time Bomb beneath Yellowstone National Park. St. Paul, Minnesota: Voyageur Press: ISBN 978-0-7603-2925-2.

Chevalerias, R., Latron, Y., Veret, C. (1957). Methods of Interferometry Applied to the Visualization of Flows in Wind Tunnels. *Journal of the Optical Society of America*, 47 (8), 703. doi:10.1364/JOSA.47.000703.

Hanssen, R.F. (2001). Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Netherlands: Kluwer Academic Publishers: ISBN 9780792369455.

Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., Arıkan, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514–517, 1–13.

Ivanik, O., Shevchuk, V., Kravchenko, D., Yanchenko, V., Shpyrko, S., Gadiatska K. (2019). Geological and Geomorphological Factors of Natural Hazards in Ukrainian Carpathians. *Journal of Ecological Engineering*, 20(4), 177–186.

Lu, Zh., Wright, T., Wicks, Ch. Jr. (2003). Deformation of the 2002 Denali fault earthquakes, mapped by RadarSat–1 interferometry. *Eos*, 41, 425–431.

Massonnet, D., Feigl, K.L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36 (4), 441–500.

Monnier, J.D. (2003). Optical interferometry in astronomy. *Reports on Progress in Physics*, 66 (5), 789–857.

Paschotta, R. (2012). Optical Heterodyne Detection. *RP Photonics Consulting GmbH*, 40, 243–250.

Rucci, A., Ferretti, A., Guarnieri, A.M., Rocca, F. (2012). Sentinel 1 SAR interferometry applications: The outlook for sub millimeter measurements. *Remote Sensing of Environment*, 120, 156–163.

References

Ashkenas, H.I. (1950). The design and construction of a Mach-Zehnder interferometer for use with the GALCIT Transonic Wind Tunnel. *Engineer's thesis. California Institute of Technology,* 121–122.

Bawden, G.W., Stein, R.S., Hudnut, K.W. (2001). Tectonic contraction across Los Angeles after removal of groundwater pumping effects. *Nature*, 412, 812–815.

Bahrii, I.D., Blinov, P.V., Hozhyk, P.F., Kozhemiakin, V.P. (2004). Aktyvizatsiia nebezpechnykh heolohichnykh yavyshch u Zakarpatti yak naslidok ekstremalnykh pavodkiv. Kyiv: Instytut heolohichnykh nauk NAN Ukrainy. [In Ukrainian]

Breining, G. (2007). Super Volcano: The Ticking Time Bomb beneath Yellowstone National Park. St. Paul, Minnesota: Voyageur Press: ISBN 978-0-7603-2925-2.

Chevalerias, R., Latron, Y., Veret, C. (1957). Methods of Interferometry Applied to the Visualization of Flows in Wind Tunnels. *Journal of the Optical Society of America*, 47 (8), 703. doi:10.1364/JOSA.47.000703.

Demchyshyn, M.H. (2004). Tekhnohenni vplyvy na heolohichne seredovyshche terytorii Ukrainy. Kyiv: Hnozis. [In Ukrainian]

Hanssen, R.F. (2001). Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Netherlands: Kluwer Academic Publishers: ISBN 9780792369455.

Hooper, A., Bekaert, D., Spaans, K., Arıkan, M. (2012). Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514–517, 1–13.

Ivanik, O., Shevchuk, V., Kravchenko, D., Yanchenko, V., Shpyrko, S., Gadiatska K. (2019). Geological and Geomorphological Factors of Natural Hazards in Ukrainian Carpathians. *Journal of Ecological Engineering*, 20(4), 177–186.

Ivaniuta, S.P., Yakovliev, Ye.O. (2014). Rehionalna otsinka rivnia tekhnohennoho navantazhennia v Ukraini. *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, 6, 38–45. [In Ukrainian].

Klymchuk, L.M., Blinov, P.V., Velychko, V.F. et al. (2008). Suchasni inzhenerno-heolohichni umovy Ukrainy yak skladova bezpeky zhyttiediialnosti. Kyiv: VPTs "Ekspres". [In Ukrainian]

Kuzmenko, E.D., Bezsmertyi, A.F., Vdovyna O.P. et al. (2009). Doslidzhennia zsuvnykh protsesiv heofizychnymy metodamy. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH. [In Ukrainian]

Lu, Zh., Wright, T., Wicks, Ch. Jr. (2003). Deformation of the 2002 Denali fault earthquakes, mapped by RadarSat–1 interferometry. *Eos*, 41, 425–431.

Maksymchuk, V.Yu., Kuznietsova, V.H., Verbytskyi, T.Z. et al. (2005). Doslidzhennia suchasnoi heodynamiky Ukrainskykh Karpat. Kyiv: Naukova dumka. [In Ukrainian].

Massonnet, D., Feigl, K.L. (1998). Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Reviews of Geophysics*, 36 (4), 441–500.

Monnier, J.D. (2003). Optical interferometry in astronomy. *Reports on Progress in Physics*, 66 (5), 789–857.

Palyenko, V. P. (1992). Noveishaia heodynamyka y ee otrazhenye v relefe Ukrayni. Kyev: Naukova duma. [In Russian]

Paschotta, R. (2012). Optical Heterodyne Detection. *RP Photonics Consulting GmbH*, 40, 243–250.

Rucci, A., Ferretti, A., Guarnieri, A.M., Rocca, F. (2012). Sentinel 1 SAR interferometry applications: The outlook for sub millimeter measurements. *Remote Sensing of Environment*, 120, 156–163.

Rudko, H.Y., Osyiuk, V.A. (2012). Ynzhenernaia heodynamyka Ukrayni y Moldovi (opolznevie heosystemi). Chernovtsi: Bukrek. [In Russian]

Uhlytskykh, Ye.K., Zatserkovnyii, V.I., Tishaiev, I.V. (2016). Monitorynh deformatsii vulkanichnykh struktur na osnovi dystantsiinykh zonduvan Zemli. *Teoretychni ta prykladni aspekty heoinformatyky*, 13, 4–8. [In Ukrainian]

Vialov, O.S., Andreeva-Hryhorovych, A.S., Havura, S.P. etal. (1989). Rehyonalnaia skhema stratyhrafyy melovikh otlozhenyi Ukraynskykh Karpat. *Paleontolohycheskyi sbornyk*, 26, 71–72. [In Russian]

Надійшла до редколегії 05.03.2020

E. Uglitskih, PhD Student,
E-mail: evgeniyuglitskih1993@gmail.com;
S. Vyzva, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: vyzhvas@gmail.com;
O. Ivanik, Dr. Sci. (Geol.), Prof.,
E-mail: om.ivanik@gmail.com;
Taras Shevchenko National University of Kyiv,
Institute of Geology, 90 Vasylkivska Str., Kyiv, 03022, Ukraine

VERTICAL DISPLACEMENT MONITORING OF ZAKARPATTYA REGION TERRITORY BASED ON RADAR INTERFEROMETRY DATA

The article presents result of deformation monitoring in Zakarpattya region, performed using the method of radar interferometry. The method of radar interferometry allows to monitor the displacements of the earth's surface in real time and quickly obtain up-to-date data. As a result of the research of the Carpathian model landfill, 26 pairs of interferograms for the period 2016–2018 were processed. As a result of these operations, a general map of vertical displacements of the earth's surface of the Carpathian model landfill was constructed. The territory is ranked into 3 zones according to the indicators of vertical displacements of the earth's surface. It is confirmed that the use of interferometry data is effective for detailed analysis of the regime and dynamics of dangerous geological processes. These surveys are of great value and with good resolution and appropriate processing algorithm give reasonable results and conclusions, which in combination with lithological-stratigraphic, geomorphological and structural-tectonic studies can be used to predict dangerous geological processes and minimize their negative impact on nature and man-made systems.

Keywords: remote sensing, interferometry, displacement of the earth's surface, dangerous geological processes.

Е. Углицких, асп.,
E-mail: evgeniyuglitskih1993@gmail.com;
С. Выжва, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: vyzhvas@gmail.com;
Е. Иваник, д-р геол. наук, проф.,
E-mail: om.ivanik@gmail.com;
Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко,
УНИ "Институт геологии", ул. Васильковская, 90, г. Киев, 03022, Украина

МОНИТОРИНГ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СМЕЩЕНИЙ ТЕРРИТОРИИ ЗАКАРПАТЬЯ ПО ДАННЫМ РАДАРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Представлены результаты мониторинга деформаций земной поверхности территории Закарпатья, выполненного с помощью метода радарной интерферометрии. Метод радарной интерферометрии позволяет осуществлять мониторинг смещений земной поверхности в режиме реального времени и оперативно получать актуальные данные. В результате проведенных исследований Карпатского модельного полигона были обработаны 26 пар интерферограмм за период 2016–2018 гг. и построена общая карта вертикальных смещений земной поверхности Карпатского модельного полигона. Выполнено ранжирование территории на три зоны согласно показателям вертикальных смещений земной поверхности. Подтверждено, что использование данных интерферометрии является эффективным для детального анализа режима и динамики опасных геологических процессов, в частности оползней. Данные съемки имеют прикладную ценность и при хорошей разрозненности и соответствующем алгоритме обработки дают обоснованные результаты, которые в сочетании с данными литолого-стратиграфических, геоморфологических и структурно-тектонических исследований могут быть использованы для прогнозирования опасных геологических процессов и минимизации их негативного влияния на природно-техногенные системы.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, интерферометрия, смещение земной поверхности, опасные геологические процессы.