

Л. Ю. Кочеригін¹, І. В. Кімейчук¹

Білоцерківський національний аграрний університет, м. Біла Церква, Україна

ГЕОІНФОРМАЦІЙНИЙ МОНІТОРИНГ ЗМІН ВКРИТИХ ЛІСОВОЮ РОСЛИННІСТЮ ЛІСОВИХ ДІЛЯНОК ЧЕРКАСЬКОЇ ОБЛАСТІ ЗА РАДАРНИМИ ДАНИМИ

Мета цієї статті полягає в проведенні геоінформаційного моніторингу змін вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок Черкаської області за допомогою радарних даних. Конкретні цілі дослідження включають: здійснення аналізу динаміки змін у лісовому покриві Черкаської області протягом певного періоду часу з використанням даних, отриманих із супутникових радарів. Визначення зон та ділянок з найвищими темпами втрати лісового покриву, що дозволить ідентифікувати основні зони дефорестації. Вивчення можливостей використання радарних даних для виявлення змін у лісовому біомі і оцінки їх впливу на біорізноманіття і екосистемні послуги. Порівняння результатів цього дослідження з попередніми даними про лісовий покрив та зміни в ньому на території Черкащини, щоб визначити тренди та виявити можливі проблеми в управлінні лісовими ресурсами. Розгляд можливостей використання цих даних для розробки дієвих заходів з охорони лісів та сталих лісогосподарських практик у Черкаській області. Ця стаття спрямована на сприяння сталому лісовому управлінню та допомогу в збереженні цінних екосистем лісів Черкащини через застосування сучасних геоінформаційних методів та аналізу радарних даних. Визначено основні можливі дії та заходи, які можна вжити у рамках моніторингу змін вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок регіону дослідження за радарними даними, а саме: збір радарних даних та їх обробка є основним етапом у проведенні моніторингу. За допомогою sentinel-1, для отримання інформації про лісовий покрив та зміни в ньому. Також здійснено аналіз та інтерпретація даних із використанням різноманітних методів обробки, включаючи обробку сигналів, класифікацію та моделювання. На останньому етапі моніторингу вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок здійснено картографування зон дефорестації з метою ідентифікації та картографувати зони, де відбуваються зміни в лісовому покриві, особливо дефорестація. Ця інформація може бути корисною для здійснення заходів з охорони лісів. Також здійснено моніторинг біорізноманіття та екосистемних послуг, тобто оцінка впливу змін в лісовому біомі на біорізноманіття та надані екосистемні послуги, такі як регулювання водних ресурсів та вуглецевий обмін. Одним з головних завдань дослідження є розробка рекомендацій для впровадження конкретних дій, спрямованих на збереження лісових ресурсів та стимулювання сталого лісогосподарського управління з використанням сучасних геоінформаційних систем і засобів. Це може включати в себе впровадження механізмів

¹**Кочергін Леонід Юрійович**, канд. пед. наук, доцент кафедри геодезії та землеустрою, Білоцерківський національний аграрний університет, м. Біла Церква. E-mail: leonid.kocherygin@btsau.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0002-1896-6036>;

¹**Кімейчук Іван Васильович**, асистент кафедри лісового господарства, Білоцерківський національний аграрний університет, м. Біла Церква. E-mail: i_kimeichuk@nubip.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9100-1206>, ResearcherID: AEF-3953-2022, ScopusID 57234090100.

моніторингу та звітності для лісогосподарських підприємств та філій, а також розробку стратегій охорони лісів, а останнє можливе тільки при співпраці з органами влади та громадськими організаціями, а також з недержавними громадськими організаціями, які працюють у сфері лісового управління та екологічного моніторингу. Це допоможе забезпечити практичне застосування результатів дослідження.

Ключові слова: *геоінформаційний моніторинг, лісовий біом, дефорестація, супутникові дані, екологічний моніторинг, зміни в ландшафті, геоінформаційні системи.*

Вступ. Ліси відіграють надзвичайно важливу роль у збереженні біорізноманіття, регулюванні клімату, забезпеченні природних ресурсів та наданні ключових екосистемних послуг. Проте, лісові екосистеми по всьому світу стикаються з серйозними викликами, такими як дефорестація, зміни використання землі, та зміни клімату. В умовах зростаючого тиску на лісові ресурси важливо вдосконалити методи моніторингу та управління лісами, щоб забезпечити їх сталість та важливість для збереження природного середовища та підтримки життя на Землі (Change detection).

Геоінформаційний моніторинг змін вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок стає все більш актуальним та ефективним інструментом для дослідження та захисту лісів. Черкаська область, розташована в центральній частині України, має значну площу лісів, які відіграють важливу роль у збереженні біорізноманіття та екологічному балансі регіону. Однак, ці ліси також піддаються впливу різних антропогенних та природних факторів, що може призвести до змін у їхньому стані та розподілі.

У цьому контексті, використання радарних даних та геоінформаційних методів надає можливість ефективного моніторингу змін у лісовому покриві та оцінки їхнього впливу на природне середовище. Радари на супутниках дозволяють отримувати інформацію про структуру та властивості лісів незалежно від погодних умов та пори доби, що робить їх цінним інструментом для моніторингу. Такий підхід дозволяє не лише виявляти зміни, але й розуміти їхні причини та можливі наслідки для довкілля та суспільства (Canty, 2019).

У даній статті ми розглянемо можливості та перспективи геоінформаційного моніторингу змін вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок Черкаської області з використанням радарних даних. Ми також розглянемо ключові аспекти цього дослідження та можливість використання його результатів для покращення управління лісовими ресурсами та збереження екосистем області.

Переконливим свідченням ефективності використання космічних знімків для практичних і наукових цілей є постійне розширення спектра задач, які вирішуються завдяки результатам обробки космічних знімків. Ефективність застосування даних ДЗЗ залежить від точності дешифрування та достовірності

інтерпретації отриманих результатів. Сучасні дані ДЗЗ володіють необхідними технічними характеристиками, що дозволяють вирішувати широкий спектр завдань, космічного моніторингу лісових екосистем (Lakyda, 2008; Myklush, Chaskovskyi, Havryliuk, 2013; Chang, Z., Hobeichi, S., Wang, Y.-P., Tang, X., Abramowitz, G., Chen, Y., et al., 2021).

Наявність актуальних і точних даних про стан лісів є необхідною передумовою для ефективного управління та збереження лісового біорізноманіття. Значну роль у вирішенні багатьох питань інформаційної підтримки у сфері збереження, відтворення та посилення ролі лісових екосистем відіграють дані дистанційного зондування Землі (ДЗЗ). Вони дозволяють оперативно отримувати об'єктивну інформацію про стан та динаміку лісового покриву, оцінювати біофізичні параметри лісових екосистем, визначати лісівничі та таксаційні показники лісових насаджень, виявляти і попереджати ризики від втрати лісами своїх функцій. Завдяки цьому значення технологій спостереження за станом земного покриву з космосу в сучасних умовах постійно зростає (Le Toan, et al, 2011; Saatchi, 2011; Khati, et al., 2020; Kraatz, S., et al., 2022).

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Передумови використання даних ДЗЗ визначаються, виходячи зі специфіки вирішуваних задач. Так, використання різночасових знімків дозволяє відслідковувати динаміку змін рослинного покриву та виявити площі, де зникли лісові масиви або відбулося лісовідновлення, а також багато інших задач. Основними параметрами даних космічної зйомки, які є принципово важливими для отримання якісного результату, вважаються просторове і спектральне розрізнення, ширина полоси сканування, періодичність зйомки (Vorster, et al., 2020).

Наявні підходи стосовно дешифрування даних ДЗЗ дозволяють поєднувати спектральну інформацію космічних знімків із додатковими наборами геопросторових даних, такими як цифрові моделі рельєфу (ЦМР), глобальні карти земного покриву, лісовпорядні картографічні бази даних. У більшості випадків використання супутньої інформації забезпечує високу точність і достовірність кінцевого результату (Lesiv, 2012; Chen, Laurin, & Valentini, 2015; Congalton, 2015).

Мета дослідження полягає в покращенні збереження лісових ресурсів, визначенні факторів, які спричиняють зміни в лісовому покриві, і виявленні способів їхнього попередження чи компенсації. Також, дослідження спрямоване на зрозуміння важливості лісів для екосистем та суспільства в цілому і на розвиток ефективних стратегій збереження цих природних ресурсів.

Об'єкт дослідження є вкриті лісовою рослинністю землі в межах Черкаської області, які розташовані в центральній частині України. Основним

об'єктом є ліси, які включають в себе різноманітні типи лісів, від лісів хвойних та листяних деревних видів до різноманітних рідкісних і ендемічних видів рослин та тварин.

Дослідження спрямоване на аналіз змін, які відбуваються в лісовому покриві регіону дослідження з часом через використання сучасних геоінформаційних систем за радарними даними РСА місії Sentinel-1. Це можуть бути зміни, пов'язані з дефорестацією, змінами в розподілі лісів, відновленням природних лісових екосистем тощо. Також об'єктом дослідження є екосистеми та біорізноманіття, які залежать від лісового покриву, а також екосистемні послуги, які ліси надають суспільству.

Важливим аспектом об'єкта дослідження є Черкаська область як конкретна територія, яка піддавалася впливу різних антропогенних та природних факторів. Аналіз лісового покриву та його змін на цій території надає можливість розуміти вплив цих факторів на природне середовище та суспільство в даному регіоні.

Матеріали і методи досліджень. Матеріали. Радарні дані: Використання радарних даних від супутників, таких як Sentinel-1, є ключовим елементом дослідження. Ці дані надають інформацію про властивості лісового покриву, такі як висота дерев, щільність та структура рослинності.

Геопросторові дані. Географічні інформаційні системи (ГІС) надають можливість обробки та аналізу геопросторових даних, включаючи картографічні дані, цифрові моделі рельєфу, координати досліджуваних лісових ділянок та інші геодані (QGIS).

Попередні дані та джерела інформації. Попередні дані про лісовий покрив, зміни в ньому та інші структурні дані про довкілля можуть бути використані для порівняння з результатами моніторингу.

Методи. Обробка та аналіз радарних даних. Радарні дані піддаються обробці, включаючи калібрування та фільтрацію. Далі проводиться аналіз сигналів, що дозволяє визначити властивості лісового покриву та зміни в ньому.

Класифікація і сегментація: Застосування алгоритмів класифікації даних радару для ідентифікації різних типів лісового покриву та зон дефорестації. Сегментація зображень може використовуватися для виділення окремих об'єктів та зон в інтересуючих ділянках.

Геостатистичний аналіз. Геостатистичні методи можуть включати аналіз просторової автокореляції та інші методи для вивчення розподілу змін у лісовому покриві.

Моделювання та прогнозування. Моделювання може використовувати статистичні та геоінформаційні методи для прогнозування можливих змін у лісовому покриві на основі історичних даних та актуальних трендів.

Геоінформаційний аналіз. Геоінформаційні системи використовуються для картографування результатів та візуалізації даних, створення тематичних карт та аналізу просторових зв'язків (Filipponi, 2019; Flannigan, Stocks, Turetsky, & Wotton, 2009; Fore, Chapman, et al., 2015; James, 2013).

Методологічну основу проведених досліджень склали сучасні методи дешифрування супутникових знімків. Під час збору інформації використано методи випадкової стратифікованої вибірки та візуальне дешифрування вибіркових одиниць за знімками надвисокого просторового розрізнення. Під час цифрової обробки супутникових знімків використовувалися алгоритми машинного навчання, зокрема SAR Sentinel-1 та Earth Engine (Sentinel-1).

Результати дослідження та обговорення. Попереднє оброблення даних системою Sentinel-1. Для виконання геоінформаційного моніторингу змін вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок Черкаської області було використано дані SAR Sentinel-1. Ці дані доступні для завантаження на сайті ESA (Small & Schubert, 2008), проте, оскільки досліджувана територія не покривається однією сценою, то в такому випадку необхідно завантажувати та обробляти декілька сцен. Щоб не обробляти окремі сцени, обробку даних SAR Sentinel-1 було виконано за допомогою платформи «хмарних» обчислень GEE (рис. 1).

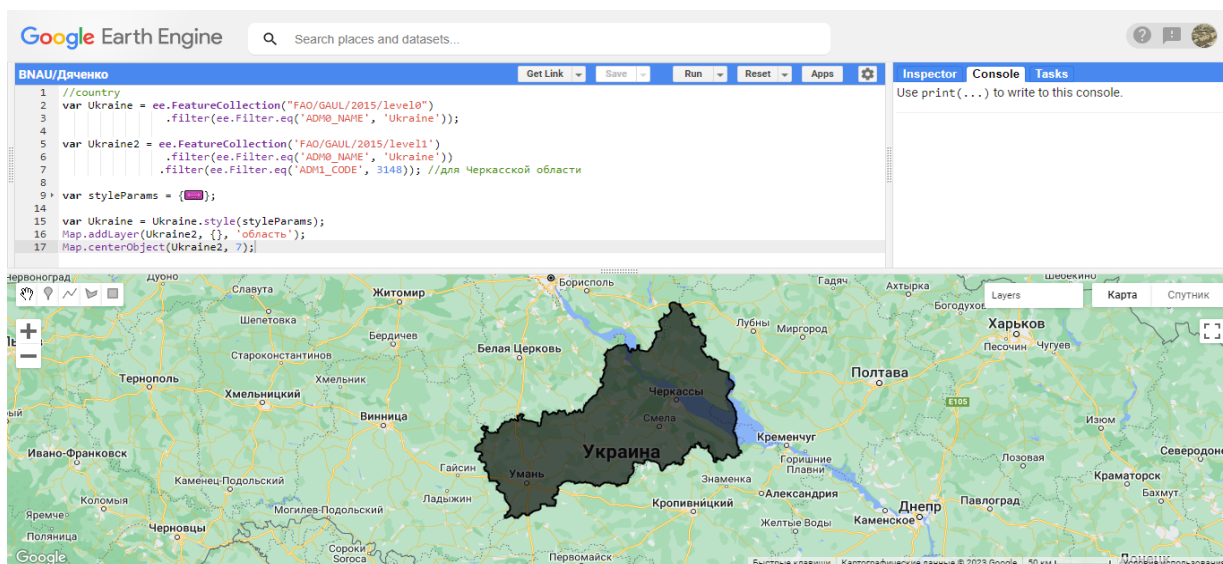


Рис. 1. Робота в Google Earth Engine

Earth Engine – це платформа для наукового аналізу та візуалізації наборів геопросторових даних для академічних, некомерційних, ділових та державних користувачів. Earth Engine розміщує супутникові зображення і зберігає їх у загальнодоступному архіві даних, який включає історичні зображення Землі, отримані більш ніж за сорок років. Зображення, що отримуються щодня, потім стають доступними для інтелектуального аналізу даних у глобальному масштабі

(Google Earth Engine).

Алгоритми виявлення змін вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок. Повторні знімки дають змогу оцінити зміни в типі або стані поверхневих об'єктів. Це один з найважливіших видів аналізу в дистанційному зондуванні, який зазвичай називають виявленням змін. Багато з цих аналізів використовують зображення, отримані в два моменти часу, відомі як бітемпоральне виявлення змін, що є основною темою цього розділу. Однак дедалі частіше більш доступні часові ряди зображень надають можливість виявлення різночасових змін (Breiman, 2001; Holtzman, et al., (2021).

Порівняння зображень після класифікації кожного з них називається виявленням змін після класифікації, яке полягає лише в порівнянні для певного місця присвоєного класу на одній карті з присвоєним класом на іншій карті. Незважаючи на те, що ця операція є простим растровим ГІС-аналізом, вона часто не є першим вибором більшості аналітиків. Це пов'язано з тим, що точність результату, як правило, низька, оскільки він включає будь-які помилки, присутні у вихідних класифікаціях апроксимується як добуток загальної точності окремих класифікацій.

Частково через низьку точність виявлення змін після класифікації, аналіз спектральних змін між двома (або більше) датами, який називається виявленням спектральних змін, часто надають перевагу для аналізу традиційних оптичних зображень (а не лідарних чи радарних даних). Незалежно від того, чи є одиницею аналізу піксель, околиця, різночасовий сегмент або навіть (рідко) спектральний клас, дуже важливо дотримуватися етапів підготовки зображення, які мінімізують сигнал від варіацій, що можуть бути сплутані з сигналом виявлення змін, який нас цікавить. В ідеалі це означає, що зображення, які порівнюються, є такими (Schmitt, et al., 2008; Shao & Zhang, 2016; Sinha, et al., 2015; Sun, G., et al., 2011; Treuhaft, 2004):

1. Отримані з одних і тих самих або добре відкаліброваних датчиків, в один і той самий час доби, з однаковим миттєвим полем зору та кутом огляду.
2. Для міжрічного аналізу – дані, отримані протягом одного сезону, щоб мінімізувати розбіжності через фенологічні зміни.
3. Добре сумісно зареєстровані, бажано з точністю до двох десятків пікселя або менше.
4. Без хмар в зоні аналізу.
5. З поправкою на відбиття від верхніх шарів атмосфери або (краще) від поверхні (нижніх шарів атмосфери).
6. Вільні від інших умов, які не вважаються частиною сигналу, що становить інтерес. Прикладами останнього пункту можуть бути наявність відмінностей у вологості ґрунту при оцінці змін у наметовому покриві лісових

водно-болотних угідь або відмінності у датах збирання врожаю при оцінці змін у рослинному покриві на основі знімків, отриманих восени.

Методи виявлення спектральних змін можна класифікувати (не взаємовиключно) за такими рівнями: (1) візуальна інтерпретація, (2) алгебра зображень, (3) перетворення/зменшення даних, (4) класифікація і (5) статистичні. Описані тут категорії і методи є поширеними як у дослідженнях, так і в застосуванні дистанційного зондування, але вони в жодному разі не є вичерпними (Whitman, et al., 2018).

Візуальна інтерпретація. Порівняння зображень двох дат – це завжди перше, з чого слід починати, і його легко виконати за допомогою однієї з трьох базових методик. У першому випадку, відомому як компонування різночасових кольорових зображень, два відповідні радіометрично відкалібровані та спільно зареєстровані зображення спочатку компонуються (коли всі смуги від обох дат складаються в одне зображення), а потім для відображення вибираються смуги від різних дат, щоб підкреслити зміну інтервалу між ними. У другому методі зображення не складаються, а відображаються з одним одне на одне. Для візуалізації змін можна використовувати інструменти, доступні в більшості пакетів обробки зображень, зокрема, проводити пальцем по одному зображенню і переходити від одного зображення до іншого. Третій метод полягає в тому, щоб просто переглядати спільно зареєстровані і геоприв'язані зображення поруч, використовуючи типові інструменти панорамування, масштабування і наведення курсору для цільового аналізу (Wicks, et al., 2018).

Однією з основних цілей візуальної інтерпретації часто є допомога у виборі найкращих методів виявлення змін відповідно до цілей аналізу. У деяких випадках, однак, це може бути механізмом, за допомогою якого проводиться аналіз. В останньому випадку часто використовують попереднє оцифрування для виявлення та класифікації змін між зображеннями. У деяких випадках проводиться інтерпретація вибірки точок. Однак у будь-якому випадку аналітик може використовувати елементи інтерпретації зображень, окрім відтінку (наприклад, текстуру, тіні, візерунок, форму, розмір і асоціації; Глава 6), у поєднанні зі знанням області застосування, що дає змогу отримати дуже точні результати (хоча це й трудомісткий і суб'єктивний процес).

Алгебра зображень. В алгебрі зображень арифметичні операції застосовуються до відповідних пікселів кожного зображення, а зображення змін формується з отриманих значень. Існує багато можливих алгебраїчних операцій, але найпоширенішими з них є диференціювання зображень, співвідношення зображень, евклідова відстань та аналіз вектора змін.

Розрізнення знімків, особливо з використанням індексів рослинності, є одним з найпоширеніших (і найефективніших) методів виявлення спектральних

змін. Він полягає у простому виділенні однієї або декількох смуг з однієї і тієї ж смуги (смуг) на одній і тій же території, отриманих у різні дати. Значення, що дорівнюють або близькі до нуля, ідентифікують пікселі, які мають подібні спектральні значення, а отже, ймовірно, не зазнали жодних змін між двома датами. Аналітик повинен вказати деяке порогове значення, часто евристично, за яким зміни вважаються такими, що відбулися. Результати дуже чутливі до обраного порогового значення, тому часто бажано використовувати об'єктивний процес для його вибору (Yu, & Saatchi, 2016).

Ще одним популярним методом виявлення змін є визначення співвідношення двох смуг, одна з яких датується однією датою знімка, а інша є смугою в тому ж діапазоні, але отримана зі знімку іншої дати. Простий числовий приклад з використанням двох знімків Landsat може проілюструвати ці два підходи (Fore, et al., 2015; James, et al., 2013; Joshi, et al., 2015; Keller, Palace & Hurr, 2001). На першому знімку ми маємо піксель у класі ліс з цифровими номерами 100 і 24 у ближньому інфрачервоному і червоному діапазонах, відповідно. На другий день цифрові значення для цього ж пікселя (тепер у класі «місто» або «голий ґрунт») становлять 61 і 36 у ближньому інфрачервоному (NIR) і червоному діапазонах, відповідно. Подивимось на різницю зображень та співвідношення зображень для ближнього інфрачервоного діапазону. Різниця зображень буде: $100 - 61 = 39$. Співвідношення зображень буде: $100 \div 61 = 1,64$.

Тепер, що станеться, якщо ми захочемо оцінити величину змін за допомогою більш ніж одного діапазону? Одним із поширених засобів для цього є евклідова відстань. Простіше кажучи, цей розрахунок є нічим іншим, як квадратним коренем із суми квадратів відстаней. Повертаючись до попереднього прикладу, бачимо, що різниця в червоній смузі для цього пікселя становить $24 - 36 = -12$. Отже, квадратний корінь з суми квадратів відстаней між цими двома векторами значень яскравості дорівнює:

$$D = \sqrt{(39)^2 + (-12)^2} = \sqrt{1665} = 40.8.$$

У матричній формі евклідова відстань має вигляд:

$$D = \sqrt{(x_1 - x_2)'(x_1 - x_2)}, \quad (1)$$

де x – це значення яскравості або вектор відбиття для даного пікселя, а штрих представляє транспозицію матриці. Застосувавши цю формулу до нашого прикладу, ми отримаємо:

$$D = \sqrt{(x_1 - x_2)'(x_1 - x_2)} = \sqrt{[39 \ -12] \begin{bmatrix} 39 \\ -12 \end{bmatrix}} = \sqrt{(39)^2 + (-12)^2} = \sqrt{1665} = 40.8.$$

Евклідова відстань, однак, дає лише величину багатосмугової зміни. Що, якщо ми також хочемо знати напрямок зміни? У цьому випадку потрібен аналіз

вектора змін (підмножиною якого можна вважати евклідову відстань). Цю операцію найкраще вивчати графічно. Розглянемо рис. 2, на якому два пікселі, які ми досліджуємо, зображені як вектори з цифровим значенням у ближньому інфрачервоному діапазоні по осі y і цифровим значенням у червоному діапазоні по осі x .

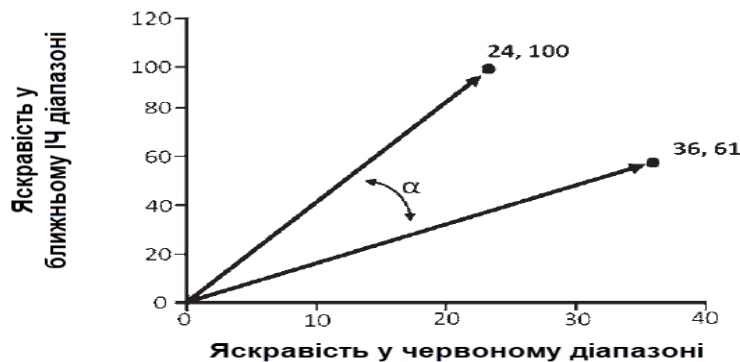


Рис. 2. Зміна векторів.

Два пікселі показані як вектори. Цифрові значення в ближньому інфрачервоному діапазоні утворюють вісь y , а у червоному діапазоні – вісь x . Кут між векторами дорівнює α

Кут між векторами дорівнює α і визначається як:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{x_1 \cdot x_2}{\|x_1\| + \|x_2\|}\right), \quad (2)$$

де

$$x_1 \cdot x_2 = \sum_{i=1}^n x_{1,i} x_{2,i} = x_{1,1} x_{2,1} + x_{1,2} x_{2,2} + \dots + x_{1,n} x_{2,n}, \quad (3)$$

який є скалярним добутком двох векторів. Для наших двох векторів скалярний добуток буде наступним:

$$x_1 \cdot x_2 = \begin{bmatrix} 100 \\ 24 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 61 \\ 36 \end{bmatrix} = 100 \cdot 61 + 24 \cdot 36 = 6100 + 864 = 6964.$$

Зазначимо, що при використанні радарних даних, які будуть використані в даній роботі, в якості каналів можуть використовуватись різні поляризації.

Іншим членом рівняння (2) є довжина вектора (також називається нормою), яка визначається як сума квадратів елементів вектора, тобто:

$$\|x\| = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}. \quad (4)$$

Для наших двох векторів довжини виглядають наступним чином:

$$\|x_1\| = \sqrt{100^2 + 24^2} = \sqrt{10000 + 576} = \sqrt{10576},$$

$$\|x_2\| = \left\| \begin{matrix} 61 \\ 36 \end{matrix} \right\| = 61^2 + 36^2 = 3721 + 1296 = 5017.$$

Зауважимо, що довжина двовимірного вектора y – це просто гіпотенуза, обчислена за відомою теоремою Піфагора. Підставивши добуток точок і довжини векторів у рівняння (2), ми можемо обчислити кут між двома векторами наступним чином:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{x_1 \cdot x_2}{\|x_1\| + \|x_2\|}\right) = \arccos\left(\frac{6964}{10576 + 5017}\right) = \arccos(0.45) = 63.5^\circ.$$

Подивимося на це з точки зору зміни території (наприклад, лісів), яку ми намагаємося виявити. Евклідова відстань між лісом і містом або голим ґрунтом становить 40.8, що дає величину вектора змін. Кут між двома векторами становить 63.5° . Подальший аналіз змін між векторами можна проводити різними способами, наприклад, шляхом встановлення порогових значень або класифікації.

Геоінформаційний аналіз змін вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок Черкащини за радарними даними. Для виконання геоінформаційного аналізу змін вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок Черкащини використаємо дані РСА місії Sentinel-1, що працює на частоті 5.405 ГГц (С діапазон). Ці дані знаходяться у відкритому доступі на сайті ESA (Small & Schubert, 2008).

Колекція Sentinel-1 містить усі сцени GRD (Ground Range Detected). Кожна сцена має одну з 3-х просторових розрізненностей (10, 25 або 40 метрів), 4 комбінації діапазонів (що відповідають поляризації сцени) і 3 режими інструменту. Загалом Sentinel-1 працює в чотирьох ексклюзивних режимах збору (рис. 3):

- Stripmap (SM) – карта смуг;
- Interferometric Wide swath (IW) – інтерферометричний режим широкої смуги;
- Extra-Wide swath (EW) – надширока смуга;
- Wave (WV) – хвиля.

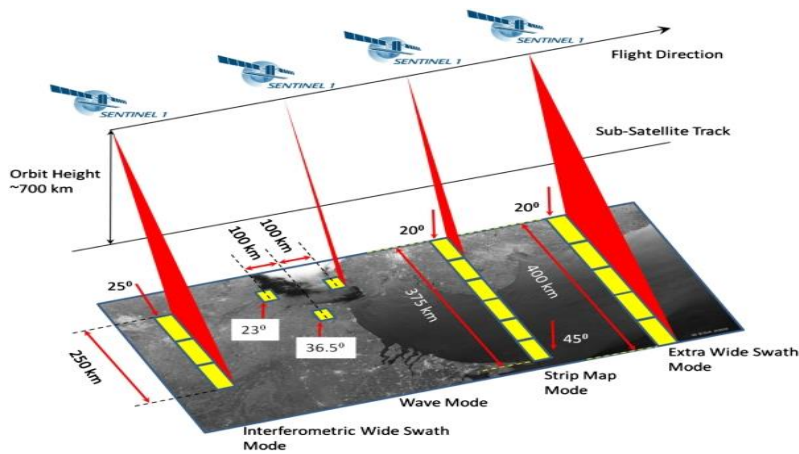


Рис. 3. Режими роботи Sentinel-1

Ми використали дані, отримані в режимі IW. Інтерферометричний режим широкої смуги (IW) є основним режимом збору даних на суші та задовольняє більшість вимог до обслуговування. Він отримує дані з діапазоном 250 км із просторовою роздільною здатністю 5 м на 20 м (одноразовий перегляд). Режим IW фіксує три підсмуги за допомогою спостереження за місцевістю з прогресивним скануванням SAR (TOPSAR). За допомогою методики TOPSAR, окрім керування променем у діапазоні, як у ScanSAR, промінь також електронно керується від задньої до передньої частини в азимутальному напрямку для кожного сплеску, уникаючи фстончастих і в результаті однорідну якість зображення по всій смугі

Прилади SAR Sentinel-1 С-діапазону підтримують роботу в одній поляризації (HH або VV) і подвійній поляризації (HH+HV або VV+VH), реалізовані через один ланцюг передачі (з можливістю перемикавання на H або V) і два паралельні ланцюги прийому для H і V поляризація.

Кожна сцена також містить додаткову смугу «кутів», яка включає приблизний кут падіння від еліпсоїда в градусах у кожній точці.

Кожна сцена була попередньо оброблена за допомогою Sentinel-1 Toolbox за допомогою таких кроків:

1. Видалення теплового шуму.
2. Радіометричне калібрування.
3. Корекція рельєфу за допомогою SRTM 30 або ASTER DEM для областей, що перевищують 60 градусів широти, де SRTM недоступний (Yordanov, & Brovelli, 2021).

Остаточні значення яскравості радіолокаційного зображення, виправлені на місцевість, зазвичай виражаються в σ_0 (сигма-нуль), що є зворотним радіолокаційним розсіюванням на одиницю площі. Одиницею σ_0 є $[m^2/m^2]$, виражені в децибелах (дБ) за допомогою логарифмічного масштабування. Стандартна формула для обчислення σ_0 на основі амплітуди зворотного

розсіювання така:

$$\sigma^0 = 10 \cdot \lg(DN^2) + K, \quad (0.1)$$

де DN – цифрове значення пікселів зображення, виміряне в зображенні амплітуди SAR (точніше, середнє значення пікселів для групи пікселів).

Якщо дані надаються як потужність зворотного розсіювання (де $DN_{power} = [DN_{amplitude}]^2$), формула виглядає так:

$$\sigma^0 = 10 \cdot \lg(DN) + K, \quad (0.2)$$

де K – коефіцієнт калібрування, який змінюється залежно від використовуваного датчика SAR і процесорної системи. Для Sentinel-1 $K = 0$.

Для території дослідження доступні сцени з поляризацією VV та VH. Ми створювали мозаїчні зображення знімків Sentinel-1 із застосуванням медіанного фільтра.

Для території Черкаської області знімки SAR Sentinel-1 доступні з 2015 р., а на момент досліджень були доступні знімки за 2022 р., тому є можливість виділити лісовкриті площі та їх зміни впродовж 2015-2022 рр. На рис. 4 показано медіанне зображення VH поляризації за 01.05-31.08.2022, а на рис. 5 – знімок Google Earth Pro за 2022 р.



Рис. 4. Мозаїка знімків Sentinel-1 VH поляризації за 01.05-31.08.2022



Рис. 5. Знімок Google Earth Pro за 2022 р.

На рис. 6 та рис. 7 показані мозаїки знімків Sentinel-1 поляризації VV та різниці поляризацій VV-VH, відповідно, за 01.05-31.08.2022. Бачимо, що на наведених мозаїчних PCA зображеннях ліси виділяються по-різному.

При поляризації VH лісовкриті площі показані світлими відтінками ($\sigma^0 \approx -15$) і суттєво контрастують із оточуючими елементами ландшафтів.

При поляризації VV лісовкриті площі виділяються досить складно, оскільки слабо контрастують із оточуючими об'єктами ($\sigma^0 \approx -9$).



Рис. 6. Мозаїка знімків Sentinel-1 VV поляризації за 01.05-31.08.2022

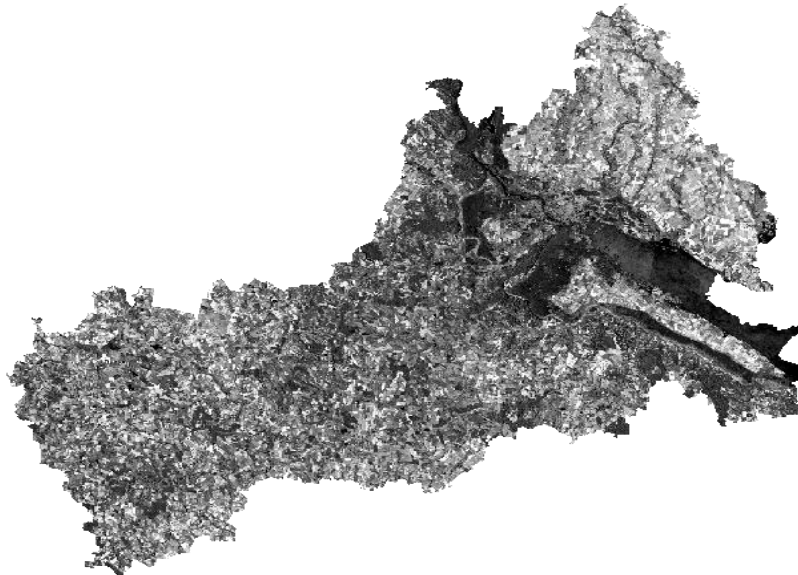
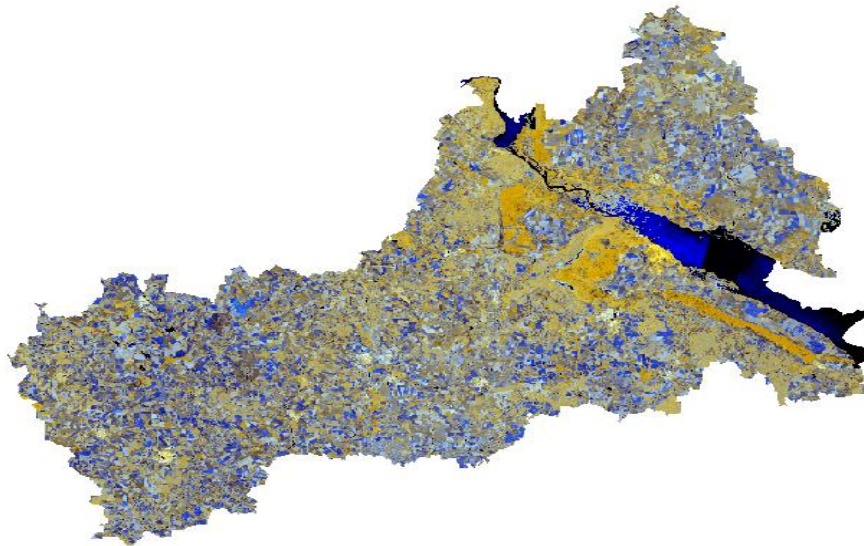


Рис. 7. Мозаїка знімків Sentinel-1 різниці поляризацій VV-VH за 01.05-31.08.2022

При різниці поляризацій VV-VH лісовкриті площі мають темний колір і високий контраст із оточуючими об'єктами ($\sigma^0 \approx 5.5$).

Отримаємо композитне зображення з наведених зображень різних поляризацій. Подальшу обробку виконуватимемо в програмному забезпеченні ArcGIS. Для цього відкриваємо ArcToolbox та вибираємо: Data Management toolbox → Raster toolset → Raster Processing toolset → Composite Bands. Результат роботи інструменту показано на рис. 8. Аналогічні зображення були побудовані для 2015-2022 рр.



**Рис. 8. Композитне SAR зображення за 01.05-31.08.2022
(R:G:B = VH:VV:VV-VH)**

Надалі було виконано неконтрольовану класифікацію методом ISODATA композитних зображень SAR за 2015-2022 рр. Результати класифікації знімка за 01.05-31.08.2022 показано на рис. 9. Клас 7 відповідає вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок площам. Далі було виконано перекласифікацію класифікованого зображення на бінарне: у результаті початкові класи 1-6 стали класом 0, а клас 7 – класом 1. Аналогічно було оброблено зображення за 2015-2021 рр.

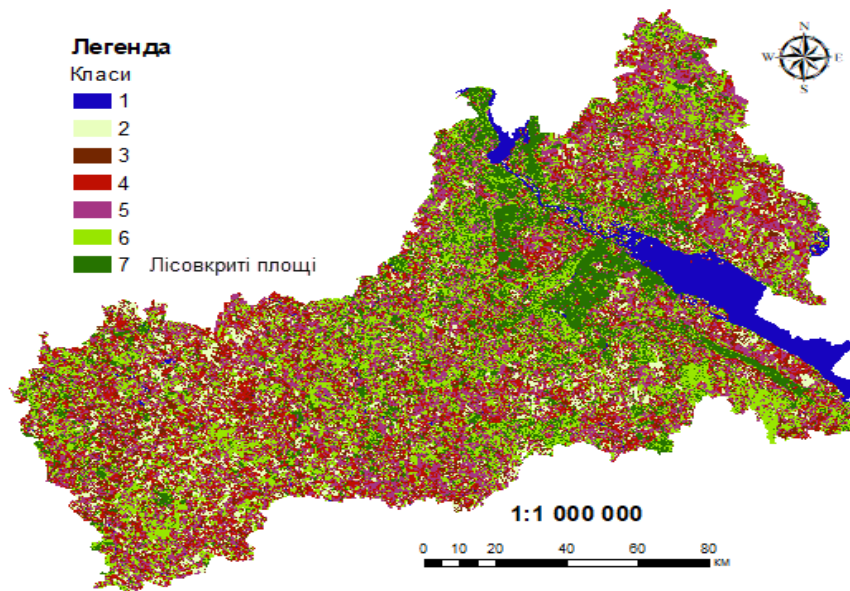


Рис. 9. Класифіковане SAR зображення за 01.05-31.08.2022 р.

Після цього було сформовано тематичну карту лісовкритих площ Черкаської області за 2022 р., показану на рис. 10.

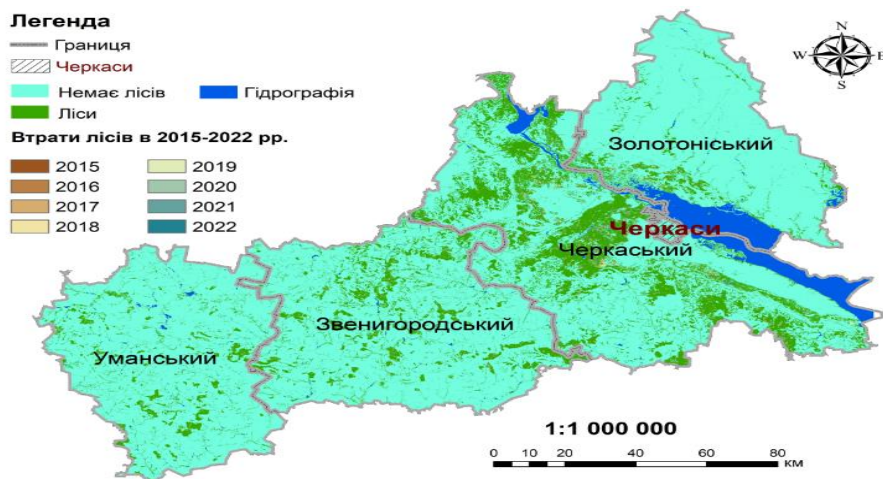


Рис. 10. Тематична карта вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок Черкаської області за 2015-2022 рр.

За даними рис. 10 і використовуючи просторові полігональні об'єкти районів Черкаської області також було побудовано тематичні карти лісовкритих площ по окремим районам Черкаської області за 2015-2022 рр. Також було обчислено площі лісів по окремим районам Черкаської області та втрати лісів за 2015-2022 рр. Результати обчислень наведено в таблиця 1.

Таблиця 1

Лісистість Черкаської області та зміна лісистості станом протягом 2015-2022 рр.

Роки	Райони Черкаської області				Σ
	Звенигородський	Золотоніський	Уманський	Черкаський	
	Площа районів, га				
	527346	424608	452843	695971,96	
	Площа лісів у 2022 р., га				
	69479,8984	26337,9004	38302,8008	187423,0000	321543,5996
	Втрати лісу, га				
2015	211,3020	105,4450	82,3841	1120,0100	1519,1411
2016	347,8320	193,5860	148,9350	1541,0900	2231,443
2017	495,6730	230,1760	215,8200	1438,6600	2380,329
2018	491,6860	275,5540	232,0830	3045,2100	4044,533
2019	308,5820	123,0880	92,1284	871,4190	1395,2174
2020	334,4330	109,9290	124,5610	1017,5100	1586,433
2021	451,7760	321,0790	124,5100	3369,8301	4267,1951
2022	359,5780	54,8792	99,0883	878,1740	1391,7195
Σ	3000,862	1413,7362	1119,5098	13281,9031	18816,0111

Із

таблиця 1 бачимо, що втрати лісового покриву по Звенигородському, Золотоніському, Уманському та Черкаському районах впродовж 2015-2022 рр. склали 4,14 %, 5,09 %, 2,84 % та 6,62 %, відповідно. У відношенні до площі

району втрати лісового покриву склали 0,57 %, 0,33 %, 0,25 % і 1,91 %, відповідно. Залісненість на 2022 р. по районах склала: 13,18 %, 6,20 %, 8,46 % та 26,93 %, відповідно. Залісненість області склала 15,31 %.

Висновки. Дослідження геоінформаційного моніторингу змін вкритих лісовою рослинністю лісових ділянок Черкаської області за допомогою радарних даних виявилось важливим кроком у розумінні динаміки та впливу змін у лісовому покриві на природне середовище та суспільство в цьому регіоні.

Використання радарних даних виявилось ефективним інструментом для отримання інформації про лісовий покрив незалежно від погодних умов та пори доби. Ці дані надають можливість аналізувати властивості лісової рослинності, щільність та структуру лісів.

Дослідження показало, що зміни в лісовому покриві мають великий вплив на біорізноманіття та надані екосистемні послуги. Втрати лісових ресурсів можуть призвести до змін у розподілі видів та загрозити різноманіття.

В статті виконано обробку даних SAR Sentinel-1 за доступний період часу 2015-2022 рр. для території Черкаської області. За допомогою некерованої класифікації виділено вкриті лісовою рослинністю лісові ділянки.

За результатами дослідження обчислено втрати лісу, за визначений період, де найбільші втрати виявлено у Черкаському районі.

References

1. Breiman, L. (2001). Random Forest. Machine Learning. Vol. 45. № 1, pp. 5-32.
2. Canty, M.J. (2019). Image Analysis, Classification, and Change Detection in Remote Sensing With Algorithms for Python Fourth edition, CRC Press. 532 p.
3. Chang, Z., Hobeichi, S., Wang, Y.-P., Tang, X., Abramowitz, G., Chen, Y., et al. (2021). New forest aboveground biomass maps of China integrating multiple datasets. Remote Sensing, 13(15), 2892.
4. Change detection (GIS). URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Change_detection_\(GIS\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Change_detection_(GIS)).
5. Chave, J., Condit, R., Aguilar, S., Hernandez, A., Lao, S., & Perez, R. Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 359(1443), 409-420.
6. Chen, Q., Laurin, G. V., & Valentini, R. (2015). Uncertainty of remotely sensed aboveground biomass over an African tropical forest: Propagating errors from trees to plots to pixels. Remote Sensing of Environment, 160, pp. 134-143.
7. Congalton, R. (2015). Assessing positional and thematic accuracies of maps generated from remotely sensed data P. Thenkabail (Ed.), Remote Sensing Handbook, Data Characterization, Classification, and Accuracies, vol. I, CRC/Taylor & Francis, Boca Raton, FL, pp. 583-601.
8. Dubayah, R., Blair, J. B., Goetz, S., Fatoyinbo, L., Hansen, M., Healey, S., et al. (2020). The global ecosystem dynamics investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. Science of Remote Sensing, 1, 100002.
9. End-to-End Google Earth Engine (Full Course Material). URL: <https://courses.spatialthoughts.com/end-to-end-gee.html>.

10. Filipponi, F., 2019. Sentinel-1 GRD Preprocessing Workflow, in: 3rd International Electronic Conference on Remote Sensing. Presented at the International Electronic Conference on Remote Sensing, MDPI, p. 11.
11. Flannigan, M., Stocks, B., Turetsky, M., & Wotton, M. (2009). Impacts of climate change on fire activity and fire management in the circumboreal forest. *Global Change Biology*, 15(3), 549-560.
12. Fore, A. G., Chapman, B. D., Hawkins, B. P., Hensley, S., Jones, C. E., Michel, T. R., & Muellerschoen, R. J. (2015). UAVSAR polarimetric calibration. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(6), 3481-3491.
13. Holtzman, N. M., Anderegg, L. D. L., Kraatz, S., Mavrovic, A., Sonnentag, O., Pappas, C., et al. (2021). L-band vegetation optical depth as an indicator of plant water potential in a temperate deciduous forest stand. *Biogeosciences*, 18(2), 739-753.
14. James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). Resampling methods. *An introduction to statistical learning*, pp. 175-201.
15. Joshi, N. P., Mitchard, E. T. A., Schumacher, J., Johannsen, V. K., Saatchi, S., & Fensholt, R. (2015). L-band SAR backscatter related to forest cover, height and aboveground biomass at multiple spatial scales across Denmark. *Remote Sensing*, 7(4), 4442-4472.
16. Keller, M., Palace, M., & Hurtt, G. (2001). Biomass estimation in the Tapajos National forest, Brazil: Examination of sampling and allometric uncertainties. *Forest Ecology and Management*, 154(3), 371-382.
17. Khati, U., Laval, M., Shiroma, G. H. X., Meyer, V., & Chapman, B. (2020). Assessment of forest biomass estimation from dry and wet SAR acquisitions collected during the 2019 UAVSAR AM-PM campaign in southeastern United States. *Remote Sensing*, 12(20), 3397.
18. Kraatz, S., Bourgeau-Chavez, L., Battaglia, M., Poley, A., Siqueira, P. (2022). Mapping and Scaling of In Situ Above Ground Biomass to Regional Extent With SAR in the Great Slave Region. *Earth and Space Science*, 9(12), e2022EA002431.
19. Kravtsova, I.V., Mendus, T.M. (2020). Cherkasy forests as an example of cultural landscape organization. *Natural sciences and education: a collection of scientific works of the Faculty of Natural Sciences and Geography. Uman: Publishing and Printing Center "Vizavy" ("Sochinsky" Publisher)*, pp. 77-79. [in Ukrainian].
20. Lakyda, I. P. (2008). Monitoring the productivity of suburban forests in Kyiv using the example of conifer plantations of the KP "Darnytskyi Forestry Management". *Scientific Bulletin of the National Agrarian University*, Vol. 118, pp. 204-208. [in Ukrainian].
21. Le Toan, T., Quegan, S., Davidson, M. W. J., Balzter, H., Paillou, P., Papathanassiou, K., et al. (2011). The BIOMASS mission: Mapping global forest biomass to better understand the terrestrial carbon cycle. *Remote Sensing of Environment*, 115(11), 2850-2860.
22. Myklush, S. I., Chaskovskyi, O. H., Havryliuk, S. A. (2013). Deciphering multi-dimensional space images for the assessment of rock groups. *Science Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine: Collection of Sciences. works Vol. 11*. pp. 144-150. [in Ukrainian].
23. QGIS Desktop testing User Guide. URL: <https://docs.qgis.org/testing/pdf/en/QGIS-testing-DesktopUserGuide-en.pdf>. Lesiv, M.Iu., Shchepashchenko, D.H., Shvidenko, A.Z., Bun, R.A. (2012). Construction of a map of forests of Ukraine based on the data of global digital maps of land cover Sciences. release NLTU of Ukraine. Vol. 22.9, pp. 24-30. [in Ukrainian].
24. Remote sensing of the Earth from space (2004). Terms and definitions of concepts: DSTU 4220-2003. [Effective from 2004-10-01]. K., State Standards of Ukraine, 2003. 24 p. (National Standard of Ukraine).

25. Remote sensing of the Earth from space (2007). Data processing. Terms and definitions of concepts: DSTU 4758:2007. [Effective from 2007-10-01]. K., State Standards of Ukraine, 21 p. (National Standard of Ukraine).
26. Saatchi, S., Marlier, M., Chazdon, R. L., Clark, D. B., & Russell, A. E. (2011). Impact of spatial variability of tropical forest structure on radar estimation of aboveground biomass. *Remote Sensing of Environment*, 115(11), 2836-2849.
27. Schmitt, A., Glaser, B., Borken, W., & Matzner, E. (2008). Repeated freeze–thaw cycles changed organic matter quality in a temperate forest soil. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 171(5), 707–718.
28. Sentinel-1 Overview. [URL: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/overview> .
29. Sentinel-1: Data Products. URL: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/data-products>.
30. Sentinel-1: Instrument Payload. URL: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/instrument-payload> .
31. Sentinel-hub: EO Browser. URL: <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>.
32. Sentinel-hub: Sentinelhub Playground. URL: <https://apps.sentinel-hub.com/sentinel-playground>.
33. Shao, Z., & Zhang, L. (2016). Estimating forest aboveground biomass by combining optical and SAR data: A case study in Genhe, Inner Mongolia, China. *Sensors*, 16(6), 834.
34. Sinha, S., Jeganathan, C., Sharma, L. K., & Nathawat, M. S. (2015). A review of radar remote sensing for biomass estimation. *International journal of Environmental Science and Technology*, 12(5), 1779-1792.
35. Small, D.; Schubert, A. (2008). Guide to ASAR Geocoding. ESA-ESRIN Technical Note RSL-ASAR-GC-AD, University of Zurich: Zurich, Switzerland, Volume 1, p. 36.
36. Sun, G., Ranson, K. J., Guo, Z., Zhang, Z., Montesano, P., & Kimes, D. (2011). Forest biomass mapping from lidar and radar synergies. *DESDynI VEG-3D Special Issue*, 115(11), pp. 2906-2916.
37. Treuhaft, R. N., Law, B. E., & Asner, G. P. (2004). Forest attributes from radar interferometric structure and its fusion with optical remote sensing. *BioScience*, 54(6), 561-571.
38. Vorster, A. G., Evangelista, P. H., Stovall, A. E. L., & Ex, S. (2020). Variability and uncertainty in forest biomass estimates from the tree to landscape scale: The role of allometric equations. *Carbon Balance and Management*, 15, 1-20.
39. Whitman, E., Parisien, M., Thompson, D. K., Hall, R. J., Skakun, R. S., & Flannigan, M. D. (2018). Variability and drivers of burn severity in the northwestern Canadian boreal forest. *Ecosphere*, 9(2), e02128.
40. Wicks, D., Jones, T., & Rossi, C. (2018). Testing the interoperability of sentinel 1 analysis ready data over the United Kingdom. *IEEE International Geoscience and Remote sensing Symposium IGARSS* (pp. 8655-8658). IEEE.
41. Yordanov, V., Brovelli, M.A. (2021). Deforestation mapping using sentinel-1 and object-based random forest classification on google earth engine. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 43 (B3-2021), 865-872.
42. Yu, Y., & Saatchi, S. (2016). Sensitivity of L-band SAR backscatter to aboveground biomass of global forests. *Remote Sensing*, 8(6), 522.

L. Yu. Kocheryhin¹, I. V. Kimeichuk¹

¹*Bila Tserkva National Agrarian University, Bila Tserkva, Ukraine*

GEOINFORMATION MONITORING OF CHANGES OF FOREST AREAS COVERED WITH FOREST VEGETATION OF THE CHERKASK REGION ACCORDING TO RADAR DATA

The purpose of this article is to carry out geo-informational monitoring of changes in forest areas covered with forest vegetation in the Cherkasy region using radar data. The specific objectives of the study include: conducting an analysis of the dynamics of changes in the forest cover of the Cherkasy region during a certain period of time using data obtained from satellite radars. Determination of zones and areas with the highest rates of forest cover loss, which will allow identification of the main areas of deforestation. Exploring the possibilities of using radar data to detect changes in the forest biome and assess their impact on biodiversity and ecosystem services. Comparison of the results of this study with previous data on forest cover and changes in it on the territory of Cherkasy region in order to identify trends and identify possible problems in the management of forest resources. Consideration of the possibilities of using this data for the development of effective forest protection measures and sustainable forestry practices in the Cherkasy region. This article aims to promote sustainable forest management and help preserve the valuable ecosystems of Cherkasy forests through the use of modern geoinformation methods and radar data analysis. The main possible actions and measures that can be taken within the framework of monitoring changes in forest areas covered with forest vegetation in the study region according to radar data are defined, namely: the collection of radar data and their processing is the main stage in monitoring. Using sentinel-1, to obtain information about forest cover and changes in it. Data analysis and interpretation were also performed using a variety of processing methods, including signal processing, classification, and modeling. At the last stage of monitoring forest areas covered with forest vegetation, mapping of deforestation zones was carried out in order to identify and map zones where changes in forest cover, especially deforestation, occur. This information can be useful for the implementation of forest protection measures. Monitoring of biodiversity and ecosystem services, i.e. assessment of the impact of changes in the forest biome on biodiversity and ecosystem services provided, such as water regulation and carbon exchange, was also carried out. One of the main tasks of the research is the development of recommendations for the implementation of specific actions aimed at preserving forest resources and stimulating sustainable forestry management using modern geoinformation systems and tools. This may include the implementation of monitoring and reporting mechanisms for forestry enterprises and branches, as well as the development of forest protection strategies, and the latter is possible only in cooperation with authorities and public organizations, as well as with non-governmental public organizations working in the field of forest management and environmental monitoring. This will help to ensure the practical application of research results.

Key words: *geoinformation monitoring, forest biome, deforestation, satellite data, ecological monitoring, changes in the landscape, geoinformation systems.*