



<https://doi.org/10.36023/ujrs.2023.10.2.237>

УДК 528.8+630

Методика визначення втрат лісу з використанням ГІС-технологій

С. І. Горелик¹, Д. К. Саул-Гозе, Р. С. Сич

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського “Харківський авіаційний інститут”, м. Харків, Україна

Однією з екологічних проблем України є незаконне використання лісових ресурсів, а саме несанкціоновані рубки лісу. За даними Державного агентства лісових ресурсів, обсяги лісопорушень досягають десятки, а іноді тисячі кубометрів деревини на рік. Отже, актуальним завданням є достовірне визначення ділянок незаконної рубки лісу. Є багато методів визначення цього правопорушення, їх можна поділити на дві великих групи: контактні та дистанційні. Контактні методи дають змогу визначати на місці факт незаконної рубки лісу, але потребують значних матеріальних і часових витрат. Серед наявних контактних даних слід зазначити відкритий Реєстр дозвільних документів на заготівлю деревини та геопортал “Публічна кадастрова карта”, яка дає змогу визначити законність рубок. Дистанційні дані дозволяють з мінімальними часовими й матеріальними витратами локалізувати ділянки рубок лісу й визначити їх геометричні характеристики, однак, мають низку недоліків, пов’язаних з метеоумовами та неоднозначною інтерпретацією космічних методів дослідження. Комплексування контактних і дистанційних даних з їх подальшим аналізом доцільно проводити, використовуючи геоінформаційні системи і технології. Геоінформаційні технології дають змогу швидко обробляти великий масив контактних і дистанційних даних, створювати картографічні моделі для їх подальшого аналізу та інтерпретації. Отже, комплексне використання контактних і дистанційних методів досліджень дасть змогу оперативно виявляти ділянки вирубаного лісу, визначити геометричні характеристики та їх законність. Розроблена методика визначення рубок лісу за допомогою ГІС-технологій полягає в комплексному використанні відкритих даних з публічних порталів про наявність лісорубних квитків, космічних знімків із супутника Sentinel-2, програмного забезпечення ArcGIS з інструментами просторового аналізу ArcToolbox. Практична реалізація розробленої методики впроваджена для усієї Харківської області. Виявлено 3299 рубок, з яких 1977 – зроблені в період з 2008 по 2021 рр. За цей же період визначено 648 рубок лісу без дозвільних документів.

Ключові слова: рубки лісу, індекс NDVI, ГІС-технології, Sentinel-2, ортофотоплан, дешифрування, ArcGIS.

© С. І. Горелик, Д. К. Саул-Гозе, Р. С. Сич. 2023

Вступ

Ліси є одним з найцінніших природних ресурсів нашої планети, але вони стикаються зі значними загрозами через безвідповідальну діяльність людини. В Україні проблема нерационального використання лісових ресурсів, а саме несанкціонованих рубок, стоїть доволі гостро. Так, за даними Державного агентства лісових ресурсів (Охорона лісів, 2022), у період з 2014 по 2022 рр. обсяги лісопорушень у середньому за рік становили 17,7–27,7 тис м³, при цьому у 2019 р. спостерігався їх найбільший об’єм 118,2 тис м³.

Встановити площі та місця рубок лісу можна, використовуючи контактні і дистанційні методи. Контактні методи дають змогу точно визначити ділянки рубок і їх геометричні характеристики, встановлювати законність, однак потребують значних часових і матеріальних витрат. Дистанційні методи, які базуються на принципах дистанційного зондування Землі (ДЗЗ), дають змогу оперативно та без значних матеріальних витрат виявляти знеліснені ділянки, хоча мають обмеження, пов’язані з метеорологічними

умовами, неоднозначною інтерпретацією даних ДЗЗ тощо (Bhunja G.S. et al., 2021, Nandasena W.D.K.V. et al., 2022). Використання геоінформаційних систем і технологій (ГІС-технологій) у завданнях моніторингу рубок лісу дає змогу комплексно обробляти контактні й дистанційні дані, створювати картографічні моделі, проводити просторовий аналіз та візуалізувати результати досліджень (Nitoslawski S. A. et al., 2021; Yan Gao et al., 2020; Андреев С. М. та ін., 2022). За останні 5–10 років з’явилося багато відкритих веб-додатків і геопорталів, присвячених моніторингу лісового покриву за даними ДЗЗ. Так, у статті (Сахно Є. Ю. та ін., 2019) наведений приклад практичного використання веб-додатка “Global Forest Watch”, який містить геопросторові дані про лісовий покрив Землі і зміну його динаміки на глобальному та регіональному рівнях, однак для визначення точніших геометричних характеристик рубок на локальному рівні потрібні архівні знімки високого та надвисокого просторового розрізнення, а також “ручний” контроль оброблених даних. Особливу увагу слід приділити сучасним методам машинного навчання для визначення рубок за космічними знімками (Shumilo, L. et al., 2020; Mitchell, A. L. et al., 2017),

*E-mail: s.horelik@khai.edu

які дають змогу досить точно та швидко аналізувати великий об'єм дистанційної інформації, але потребують великого об'єму репрезентативних даних.

Отже, визначення місць рубок та їх геометричних характеристик на великих за площею територіях раціонально проводити, використовуючи дані ДЗЗ та ГІС-технології, а встановлювати їх законність на основі контактних методів.

Метою статті є розроблення методики виявлення ділянок вирубленого лісу, їх геометричних характеристик та законності на основі комплексного використання дистанційних та контактних методів.

Головними завданнями дослідження є:

- аналіз наявних контактних і дистанційних даних для визначення рубок лісу;
- аналіз можливих методів тематичного дешифрування рубок лісу за даними ДЗЗ;
- розробка методики визначення рубок лісу за допомогою геоінформаційних технологій;
- практична реалізація розробленої методики на прикладі Харківської області.

Матеріали та методи дослідження

1. Аналіз вхідних даних для визначення рубок лісу

Проведений аналіз наявних даних показав, що у відкритому доступі (станом на кінець 2021 року) є необхідні дані для проведення дослідження. Їх перелік наведений нижче:

1) контактні дані:

Публічної кадастрової карти України (до 2021 року);

Відкритого реєстру дозвільних документів на заготівлю деревини;

кордонів адміністративних одиниць;

2) дані дистанційного зондування Землі:

космічні знімки із супутника Sentinel-2;

базові карти ArcGIS;

архівні космічні знімки з 1985 року з програми Google Earth Pro.

1.1. Контактні дані

Дані Публічної кадастрової карти України (Публічна кадастрова карта України, 2023) мають універсальне призначення та можуть бути доданими до ГІС-проекту (програмне забезпечення ArcGIS) за допомогою WMS-сервісу. До 2021 року дані були відкриті, що дало змогу порівнювати полігони зрубів лісу на предмет законності (якщо цільове використання пов'язано із рубкою лісу).

Відкритий реєстр дозвільних документів на заготівлю деревини – відкритий ресурс, де за даними розташування лісгоспів проводився контроль наявності лісорубних білетів – дозвільних документів на заготівлю деревини і, як наслідок, полігонів рубки лісу (Відкритий реєстр дозвільних документів на заготівлю деревини, 2022). Відкритий реєстр до 2022 року постійно оновлювався та працював у режимі реального часу, що скорочувало час вторинної перевірки законності полігонів вирубаного лісу. Їх законність визначена за допомогою геопорталу лісорубних квитків Державного агентства лісових ресурсів. На жаль лісорубні квитки є тільки за

останні роки та не по всіх лісгоспах.

До вхідних даних належать також просторові об'єкти – адміністративні райони та адміністративні кордони Харківської області.

1.2. Дані дистанційного зондування Землі

У дослідженні було використано дані космічного знімання із супутника Sentinel-2 (Copernicus: Sentinel-2, 2012), на основі якого було побудовано ортофотоплан методом комбінації космічних знімків, що було отримано з відкритого джерела Copernicus Open Access Hub (Copernicus Open Access Hub, 2022). Роздільна здатність космічних даних дослідження – 10 метрів на піксел.

На етапі планування також розглянуті дані космічного знімання з супутників Landsat-8 та MODIS. Дані з Landsat-8 та MODIS отримані з відкритого порталу EO Browser (Sentinel-hub EO-Browser, 2023), що є прямим сайтом завантаження безпосередньо із супутників з періодичністю від 2 до 16 діб на одну територію. Роздільна здатність космічних знімків варіює від 30 до 250 метрів на піксел (Landsat 8, 2023; MODIS Web, 2023). Ця точність є недостатньою, тому ці знімки в методиці не використовувались.

Програмним продуктом для зіставлення даних за роки від 1985 до 2017 було обрано комплекс програмних додатків Google Earth Pro (Earth Versions – Google Earth, 2021). Функціонал програмного забезпечення дає змогу підставити дані знімання Landsat-7 від 1985 року та Landsat-8 для даних 2015–2021 рр. (Landsat NASA, 2022). Точність знімання з таким часовим проміжком є недостатньою для дослідження, але використовувалася як елемент причинно-наслідкового зв'язку з виявлення старих полігонів рубок лісу (об'єкти, що були створені до 1985 року, не заносилися до вибірки). Роздільна здатність знімання 2017–2021 років становить до 1 метра на піксел.

Комплекс програмних додатків ArcGIS в дослідженні дає змогу працювати з Базовою картою (Basemap layers, 2022), що має високу роздільну здатність (до 1 метра на піксел) та дає змогу зіставляти дані дослідження за 2017–2021 роки у програмному додатку, використовуючи знімки Sentinel-2.

У Табл. 1 наведено характеристики для даних ДЗЗ, що аналізувалися в дослідженні дешифрування рубок лісу.

Аналіз технічних характеристик безкоштовних супутників показав, що найбільш оптимальний – це супутник Sentinel-2. Він має вищу роздільну здатність (10 м/піксел), середню кількість метаданих порівняно з іншими конкурентами, що легко експортується до програмного додатка ArcGIS. Приклади дистанційних даних, що використовувались у дослідженні, наведені на Рис. 1.

Обробка геоданих проводилась у геоінформаційному програмному забезпеченні ArcGIS 10.8 (ArcGIS Desktop 10.8.x system requirements, 2022). Цей програмний продукт є універсальним редактором та інструментом дослідження й візуалізації даних космічного знімання Sentinel-2 та роботи з метаданими мультиспектрального типу.

Таблиця 1. Характеристики даних ДЗЗ з безкоштовних супутників

Назва супутника	Канал – довжина хвилі	Роздільна здатність, м/пікс	Періодичність знімання, діб	Ширина смуги знімання
Sentinel-2	443–453 нм (Blue) 560–590 нм (Green) 665–680 нм (Red) 823–863 нм (Near-Infrared)	10–60	Кожні 10 діб	290 км
Landsat-8	450–515 нм (Blue) 525–600 нм (Green) 630–680 нм (Red) 1560–1660 нм (SWIR1-Infrared)	15–100	Кожні 16 діб	185 км
MODIS	459–479 нм (Blue) 545–565 нм (Green) 620–670 нм (Red)	250–1000	Кожні 2 доби	2330 км



Рис. 1. Приклади даних ДЗЗ (Україна, Харківська обл., Красноградський район)
(а – Google Earth Pro від 09.2015 р.; б – Google Earth Pro від 09.2021 р.; в – Базова карта ArcGIS від 06.2021 р.; г – Sentinel-2 від 06.2021 р.)

Додаток ArcMap дає змогу компонувати етапи роботи в один проект, що є кінцевим результатом – картографічна модель виявлення полігонів рубок лісу на території Харківської області.

Методика дослідження

Структурна схема розробленої методики визначення рубок лісу за допомогою ГІС-технологій наведена на Рис. 2.

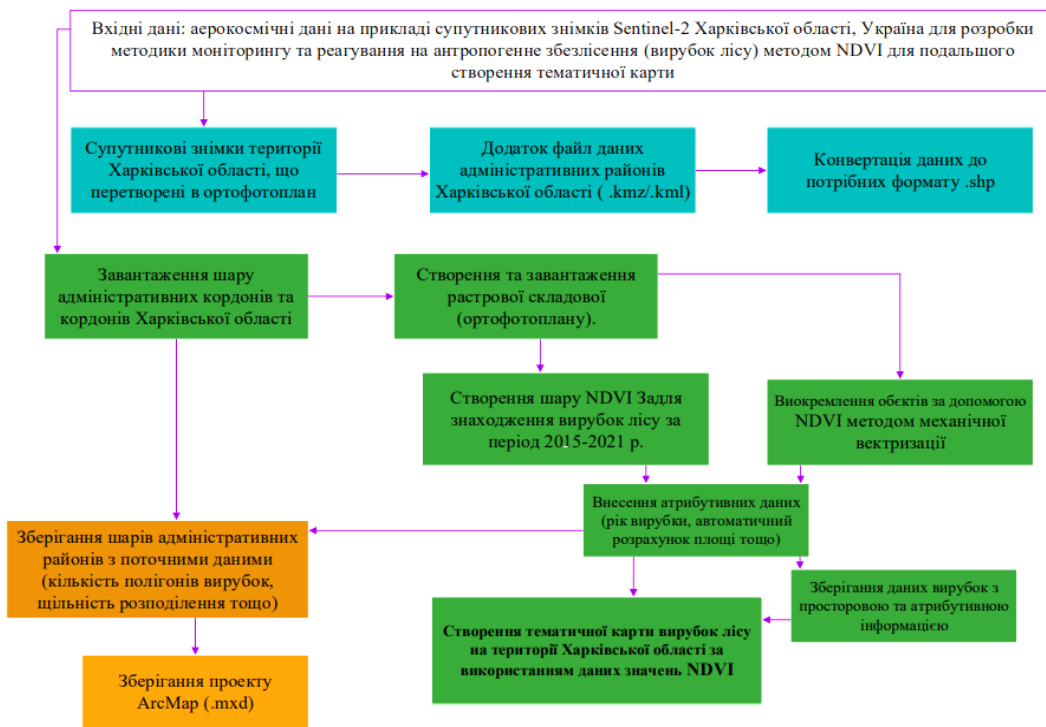


Рис. 2. Структурна схема методики визначення рубок лісу за допомогою ГІС-технологій на прикладі території Харківської області

На початковому етапі створено ортофотоплан Харківської області за допомогою інструментів ArcToolBox на основі космічних знімків із супутника Sentinel-2 (Рис. 3). Роздільна здатність ортофотоплану становить 10 м/піксель, система координат – WGS 1984.

Визначити лісові масиви та дешифрувати зони рубок лісу на космічних знімках можна, використовуючи індекс – NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) (Jiang, Z et al., 2006), та методом механічного дешифрування. У Табл. 2 зазначено переваги та недоліки методів дешифрування.

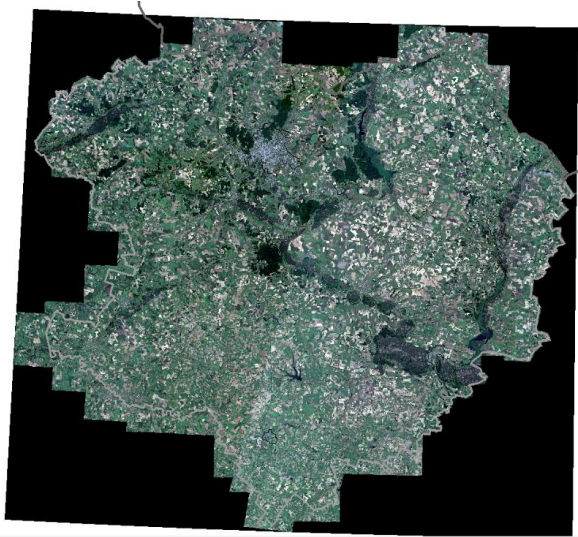


Рис. 3. Ортофотоплан Харківської області (липень 2021 р.)

Таблиця 2. Порівняльна характеристика існуючих методів виявлення зон знеліснення

Назва методу	Недоліки	Переваги
Механічне дешифрування	Витрачається багато часу монотонної роботи, помилки через людський фактор (неуважність, втома, недбалість); низька швидкість обробки	Логічні перетворення, які програма б проігнорувала, а людина через інтелект та уважність – ні
NDVI	Необхідність у потужних робочих машинах; необхідність у веденні багатьох логічних дій (метод від зворотного)	Зручність візуалізації; висока швидкість обробки; зручність експорту та імпорту даних; зручність роботи для великої кількості людей водночас

З порівняльної таблиці можна зазначити, що метод NDVI є оптимальним рішенням з обробки даних тематики виявлення зон знеліснення.

Для створення картографічної моделі насиченості пікселів NDVI необхідно отримати знімки за часовий період, що нам підходять для визначення зон знеліснення та користуватися інструкцією, як зробити новий шар даних. Процес описано в переліку дій:

завантаження знімка Sentinel-2 14 липня 2021 року Харківської області (частини, що утворює ортофотоплан);

виокремлення потрібних нам спектрів знімання (4 та 8 – червоний, інфрачервоний), як окремих знімків відтінків сірого кольору (при накладанні дають кольорове зображення);

розрахунок інструментом ArcToolBox “Raster Calculation (Калькулятор растру)” та отримання перерахунку насиченості пікселів у значення Індексу вегетації здорової рослинності;

надання необхідної кольорової гами для роботи з дешифрування значення Індексів вегетації (Рис. 4).

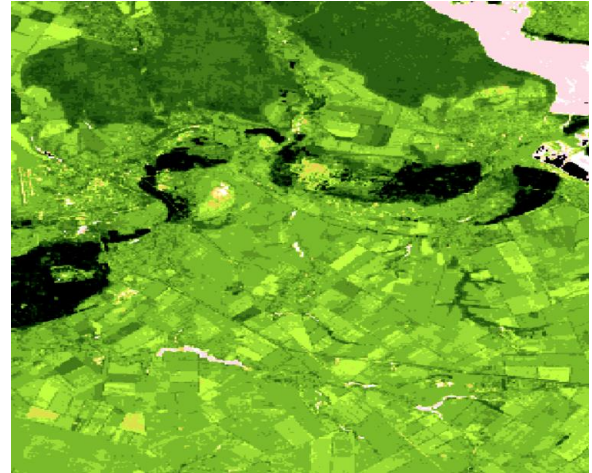


Рис. 4. Створення картографічної основи NDVI (Чугуївський район, знімання від 07.2020 р.)

На основі інтерпретації даних NDVI і знімків у каналах 3 і 4 Харківської області визначені кількісні характеристики для різних типів підстильної поверхні. Ці емпіричні дані наведені в Табл. 3. Зонам інтересу, тобто можливим ділянкам рубок лісу, відповідають такі об’єкти: “Розріджена рослинність” та “Відкритий ґрунт” з індексами NDVI від 0,025 до 0,5.

Таблиця 3. Кількісні значення пікселів різних типів об’єктів у червоному, інфрачервоному діапазонах та комбінації каналів NDVI за даними Sentinel-2

Тип об’єкта	Відображення в червоній області спектра (4-спектральний канал, довжина хвилі – 665 нм)	Відображення в інфрачервоній зоні (4-спектральний канал, довжина хвилі – 842 нм)	Значення NDVI (від –1 до 1)
Густа рослинність	0,1	0,5	0,7
Розріджена рослинність	0,1	0,3	0,5
Відкритий ґрунт	0,25	0,3	0,025
Хмари	0,25	0,25	0
Сніг, лід	0,375	0,35	–0,05
Вода	0,02	0,01	–0,25
Антропогенні матеріали (бетон, асфальт, крівлі)	0,3	0,1	–0,5

За даними Табл. 3 визначені критерії тематичного дешифрування за показниками густої, розрідженої рослинності, відкритого ґрунту.

Визначення періоду виникнення ділянки вирубаного лісу

Програмне забезпечення Google Earth Pro дає змогу рекогносцирувати ділянки, рубки на яких відбулися за період 2015–2021 роки (Рис. 5). Таким чином, використовуючи часовий компонент не завантажуючи знімки та, відповідно, не збільшуючи

часові витрати, можна отримувати дані для формування точної бази геоданих за рубками лісу.



Рис. 5. Приклад визначення полігона рубки у Богодухівському районі Харківської області методом порівняння (а – Google Earth Pro від 09.2017 р.; б – Google Earth Pro від 07.2020 р.)

Цей метод має значні часові витрати та, на жаль, в архіві Google Earth Pro наявні знімки не за всі часові періоди, що нас цікавлять. На знімках – дані за 2017 та 2020 роки, коли активна рубка припала на 2019 рік. Аналогічно можна отримати інформацію за усіма необхідними площами рубки дерев, окрім найменших, що ускладнює рекогносцирування.

Контроль визначених полігонів вирубаного лісу

За значенням коефіцієнтів піксельного насичення можна зробити висновки, де порушення цілісності шару NDVI – зони знеліснення (Рис. 6).

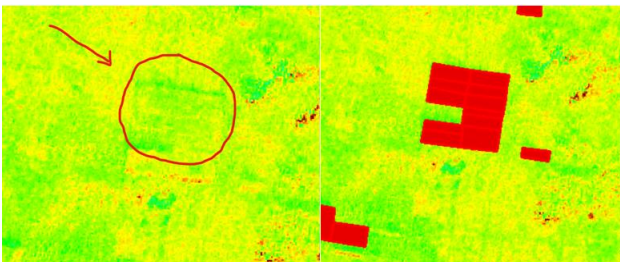


Рис. 6. Знаходження та дешифрування зон знеліснення на території Богодухівського району, Харківська область

Після обробки напівавтоматичним методом та створення класу просторових даних рубок за індексом NDVI визначаємо “зони інтересу” та далі, використовуючи ручну обробку, усуваємо пропущені й помилково визначені ділянки.

Механічна обробка являє собою векторизацію ділянок, що не потрапили до вибірки за NDVI – скриті ділянки, де ліс поступово відновлюється, і замасковані ділянки.

У векторному шарі рубок заповнюється атрибутивна інформація, де зазначається рік рубки, її законність та геометричні характеристики (площа та периметр). Законність рубок визначається за даними Відкритого реєстру дозвільних документів (Відкритий реєстр дозвільних документів на заготівлю деревини, 2022), геометричні характеристики – інструментами ArcGIS. У процесі заповнення атрибутивної інформації щодо рубок усі дані повторно перевіряються та за потреби корегуються. Приклад атрибутивної таблиці векторного шару з рубками наведений на Рис. 7.

№	тип	Shape	об'єкт	територія	стан	year	in	st	area	sh	st	length
1	Полігон	1	Верушба	верушба	верушба	2020	2780	48473	760	65232		
2	Полігон	2	Верушба	верушба	верушба	2020	35536	421058	885	39788		
3	Полігон	3	Верушба	верушба	верушба	2019	30511	708048	1395	59169		
4	Полігон	4	Верушба	верушба	верушба	2020	1178	80608	268	29579		
5	Полігон	5	Верушба	верушба	верушба	2018	12983	960894	835	28312		
6	Полігон	6	Верушба	верушба	верушба	2019	18787	994882	5879	28471		
7	Полігон	7	Верушба	верушба	верушба	2019	8198	97728	315	11032		
8	Полігон	8	Верушба	верушба	верушба	2019	14213	963188	584	74338		
9	Полігон	9	Верушба	верушба	верушба	2019	28017	318687	742	51498		
10	Полігон	10	Верушба	верушба	верушба	2019	11904	5209	450	28685		
11	Полігон	11	Верушба	верушба	верушба	2019	6378	36393	319	55631		
12	Полігон	12	Верушба	верушба	верушба	2019	5588	45118	269	73984		
13	Полігон	13	Верушба	верушба	верушба	2019	5588	41884	289	74586		
14	Полігон	14	Верушба	верушба	верушба	2019	17866	927981	822	69187		
15	Полігон	15	Верушба	верушба	верушба	2020	3274	37174	348	21372		
16	Полігон	16	Верушба	верушба	верушба	2020	1640	286991	189	60886		
17	Полігон	17	Верушба	верушба	верушба	2019	9677	56984	981	33863		
18	Полігон	18	Верушба	верушба	верушба	2019	4822	22468	78	18586		
19	Полігон	19	Верушба	верушба	верушба	2012	47383	60582	7564	85831		
20	Полігон	20	Верушба	верушба	верушба	2012	64762	474821	6385	20363		
21	Полігон	21	Верушба	верушба	верушба	2012	51188	446718	5881	54453		
22	Полігон	22	Верушба	верушба	верушба	2012	27804	443834	3872	63389		
23	Полігон	23	Верушба	верушба	верушба	2019	8883	499548	358	20797		
24	Полігон	24	Верушба	верушба	верушба	2014	8532	155878	331	13511		
25	Полігон	25	Верушба	верушба	верушба	2010	155828	888859	2187	33789		
26	Полігон	26	Верушба	верушба	верушба	2016	13884	547788	888	63248		
27	Полігон	27	Верушба	верушба	верушба	2017	14382	282255	512	78020		
28	Полігон	28	Верушба	верушба	верушба	2006	18286	818382	834	84389		
29	Полігон	29	Верушба	верушба	верушба	2008	44444	508885	3824	81877		
30	Полігон	30	Верушба	верушба	верушба	2016	21836	888385	1841	18843		
31	Полігон	31	Верушба	верушба	верушба	2015	28148	413788	3285	49584		
32	Полігон	32	Верушба	верушба	верушба	2020	14887	702845	819	42380		
33	Полігон	33	Верушба	верушба	верушба	2020	10178	488203	455	27296		
34	Полігон	34	Верушба	верушба	верушба	2019	14378	898811	486	82377		
35	Полігон	35	Верушба	верушба	верушба	2019	33728	998291	824	88189		
36	Полігон	36	Верушба	верушба	верушба	2019	28881	385273	882	58889		
37	Полігон	37	Верушба	верушба	верушба	2015	54283	132184	1189	52882		
38	Полігон	38	Верушба	верушба	верушба	2015	44881	888481	1119	12385		
39	Полігон	39	Верушба	верушба	верушба	2016	8887	877434	482	28378		
40	Полігон	40	Верушба	верушба	верушба	2015	4111	885111	252	28737		
41	Полігон	41	Верушба	верушба	верушба	2019	18885	358872	530	45788		
42	Полігон	42	Верушба	верушба	верушба	2013	64188	364788	388	48718		
43	Полігон	43	Верушба	верушба	верушба	2015	33000	888803	882	78811		
44	Полігон	44	Верушба	верушба	верушба	2010	164847	143271	1884	22388		
45	Полігон	45	Верушба	верушба	верушба	2015	15882	172424	288	88838		
46	Полігон	46	Верушба	верушба	верушба	2015	4488	358877	288	81288		
47	Полігон	47	Верушба	верушба	верушба	2014	7888	882118	335	48288		
48	Полігон	48	Верушба	верушба	верушба	2018	178182	888842	3282	48542		
49	Полігон	49	Верушба	верушба	верушба	2014	138828	872888	2825	58844		
50	Полігон	50	Верушба	верушба	верушба	2019	23828	728888	841	81284		
51	Полігон	51	Верушба	верушба	верушба	2019	18874	888381	825	88888		

Рис. 7. Атрибутивна таблиця рубок лісу на території Харківської області

На етапі перевірки точності й повноти векторних та атрибутивних даних їх верифікують. Під час виконання практичної частини дослідження виявлені такі типові помилки та неточності: неточність проведення контурів, пропущені наявні ділянки рубок, повторення полігонів, а також брак даних щодо часу рубки. На Рис. 8 наведені вищезазначені помилки.



Рис. 8. Типові помилки та похибки при визначенні вирубаних ділянок на території Харківської області.

- (1 – неточність виділення кордонів межі рубки;
- 2 – виділення ділянки, рубка якої відбувалася в інший проміжок часу (раніше 1985 року);
- 3 – груба помилка виділення залісненої ділянки)

Результати дослідження

Практичний результат розробленої методики визначення рубок лісу за допомогою ГІС-технологій наведений нижче:

векторизовано та додано до класу просторових об'єктів 3299 полігонів;

перевірено та видалено 43 хибних полігони, що становить 1,3% від усіх об'єктів;

неправильно визначені кордони встановлено у 59 полігонів (1,78% від загальної кількості рубок). Межі виправлено;

пропущено 27 ділянок рубки (0,82% від усіх об'єктів). Додані на етапі верифікації;

На основі даних дослідження сформовано карту зон рубок Харківської області (Рис. 9) за результатами тематичного дешифрування та інтерпретації даних ДЗЗ.

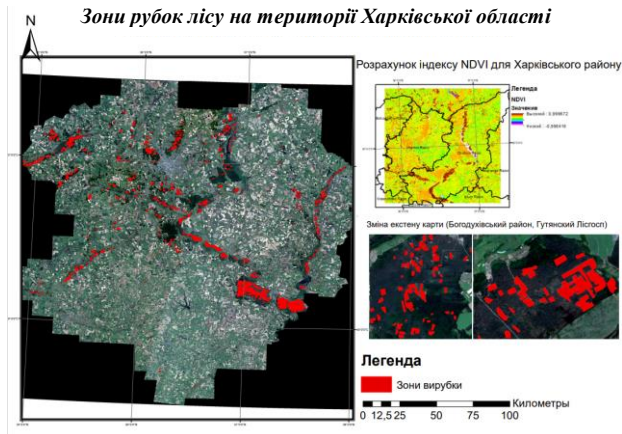


Рис. 9. Карта зон рубок на території Харківської області

Отже, розроблена методика дала змогу визначити 3299 ділянок рубок лісу у Харківській області, загальною площею 30 493 га. При цьому в період з 2008 по 2021 рік виявлено 1977 рубок, загальною площею 17 514 га (Рис. 10). Як видно з Рис. 10, найбільша кількість рубок припадає на період з 2014 по 2019 рік, при цьому найбільша площа рубок лісу спостерігалася у 2009–2010 рр. Аналіз отриманих даних показав, що середня площа однієї ділянки зрубу протягом 2011–2021 рр. становила 3,2–8,4 га, а у 2008–2010 рр. – 9,9–75,2 га. У період з 2018 по 2019 рік та у 2021 році спостерігався найбільший відсоток незаконних рубок – 48,0–52,8%, при цьому найбільш “законним” роком виявився 2020 рік – 67,7%.

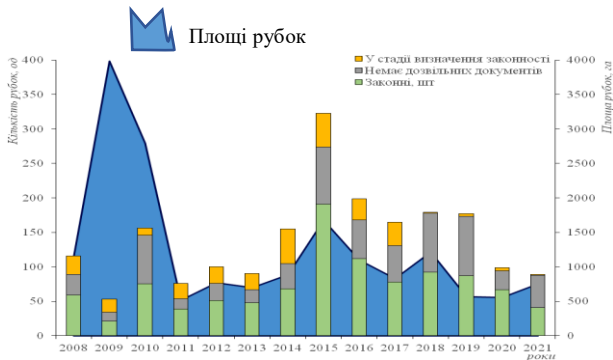


Рис. 10. Кількісні характеристики та законність рубок лісу в Харківській області у період 2008–2021 рр.

Висновки

Аналіз існуючих методик пошуку полігонів рубок лісу за допомогою даних ДЗЗ показав, що доцільним та найбільш ефективним методом є застосування методу NDVI з механічною постобробкою. Метод дає змогу за даними космічного моніторингу знаходити ділянки ймовірних рубок та векторизувати їх. Недоліком методу є детальна механічна постобробка, що збільшує загальний час виконання роботи. Це пов'язано з тим, що до значень індексу NDVI, які відповідають рубкам (розріджена рослинність, відкритий ґрунт), потрапляють інші

об'єкти – міста, селища, будь-які об'єкти антропогенного походження.

За допомогою індексної основи NDVI було векторизовано та перевірено 3299 полігонів вирубаного лісу Харківської області та надано їм атрибутивну характеристику – площинні показники, власні ID-номери, визначення законності рубок. Усього у період з 2008 по 2021 рік виявлено 648 рубок без наявних дозвільних документів.

Комплексне використання контактних і дистанційних даних дає змогу оперативно знаходити й векторизувати зони рубок лісу, створювати тематичні карти для подальшого аналізу отриманих геоданих з метою прийняття своєчасних рішень відповідними органами державної влади.

Література

- Андрєєв, С. М., Горелик, С. І., Нечаусов, А. С., Саул-Гоє, Д. К. (2022) Застосування геоінформаційних технологій для побудови картографічних моделей небезпечних метеорологічних явищ. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 1(67), 4–12. DOI: 10.26906/SUNZ.2022.1.004.
- Відкритий реєстр дозвільних документів на заготівлю деревини (2022). Взято з <https://lk.ukrforest.com/forest-tickets/index>.
- Охорона лісів від незаконних рубок (2022). *Державне агентство лісових ресурсів*. Взято з <https://forest.gov.ua/napryamki-diyalnosti/lisove-gospodarstvo/ohorona-i-zahist-lisiv/ohorona-lisiv-vid-nezakonnih-rubok>.
- Публічна кадастрова карта України (2023). Взято з <https://map.land.gov.ua/>.
- Сахно, Є. Ю., Терещук, О. І., & Янченко, О. П. (2019). Проведення геосистемного моніторингу вирубки лісів у Чернігівському районі. *Технічні науки та технології*, 2(16), 181–189. DOI: 10.25140/2411-5363-2019-2(16)-181-189.
- ArcGIS Desktop 10.8.x system requirements. System Requirements Documentation. (2022). Retrieved from <https://desktop.arcgis.com/en/system-requirements/latest/arcgis-desktop-system-requirements.htm>.
- Basemap layers. Documentation. ArcGIS Developers. (2022). Retrieved from <https://developers.arcgis.com/documentation/mapping-apis-and-services/maps/basemap-layers/>.
- Bhunia, G. S., Shit, P. K., Sengupta, D. (2021). Free-open access geospatial data and tools for forest resources management. In: *Spatial modeling in forest resources management: rural livelihood and sustainable development* (pp. 651–675). Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-56542-8_28.
- Copernicus Open Access Hub (2022). Retrieved from <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>.
- Copernicus: Sentinel-2. (2012). Retrieved from <https://www.eoportal.org/satellite-missions/copernicus-sentinel-2#copernicus-sentinel-2--the-optical-imaging-mission-for-land-services>.
- Earth Versions – Google Earth. (2021). Retrieved from <https://www.google.com/intl/en/earth/versions/>.
- Jiang, Z., Huete, A., Chen, J., Chen, Y., Li, J., Yan, G., & Zhang, X. (2006). Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 101(3), 366–378. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.003>.
- Landsat-8 U.S. Geological Survey. (2023). Retrieved from <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>.

- Landsat NASA. (2022). Landsat-7. Landsat Science. Landsat Science a Joint NASA/USGS Earth Observation Program. Retrieved from <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-7/>.
- Mitchell, A. L., Rosenqvist, A. & Mora, B. (2017). Current remote sensing approaches to monitoring forest degradation in support of countries measurement, reporting and verification (MRV) systems for REDD+. *Carbon Balance Manage*, 12, 9. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13021-017-0078-9>.
- MODIS Web. (2023). Retrieved from <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/>.
- Nandasena, W. D. K. V., Brabyn, L., Serrao-Neumann, S. (2022). Using Remote Sensing for Sustainable Forest Management in Developing Countries. In: *The Palgrave Handbook of Global Sustainability*. Palgrave Macmillan, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-38948-2_35-1.
- Nitoslawski, S. A., Wong-Stevens, K., Steenberg, J. W. N., Witherspoon, K., Nesbitt, L., & Konijnendijk van den Bosch, C. C. (2021). The digital forest: Mapping a decade of knowledge on technological applications for forest ecosystems. *Earth's Future*, 9, e2021EF002123. <https://doi.org/10.1029/2021EF002123>.
- Sentinel-hub EO-Browser. (2023). Retrieved from <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>.
- Shumilo, L., Yailymov, B., Lavreniuk, M., & Bilokonska, Y. (2020). Remote Sensing Approaches for Deforestation Identification in Ukraine. IEEE 5th International Symposium on Smart and Wireless Systems Within the Conferences on Intelligent *Data Acquisition and Advanced Computing Systems* (IDAACS-SWS). DOI:10.1109/idaacs-sws50031.2020.9297054.
- Yan Gao, Margaret Skutsch, Jaime Paneque-Gálvez and Adrian Ghilardi (2020) Remote sensing of forest degradation: a review. *Environmental Research Letters*, 15, 103001, DOI: 10.1088/1748-9326/abaad7.
- sentinel-2#copernicus-sentinel-2--the-optical-imaging-mission-for-land-services.
- Earth Versions – Google Earth. (2021). Retrieved from <https://www.google.com/intl/en/earth/versions/>.
- Jiang, Z., Huete, A., Chen, J., Chen, Y., Li, J., Yan, G., & Zhang, X. (2006). Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, 101(3), 366–378. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.003>.
- Landsat-8 U.S. Geological Survey. (2023). Retrieved from <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>.
- Landsat NASA. (2022). Landsat-7. Landsat Science. Landsat Science a Joint NASA/USGS Earth Observation Program. Retrieved from <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-7/>.
- Mitchell, A. L., Rosenqvist, A. & Mora, B. (2017). Current remote sensing approaches to monitoring forest degradation in support of countries measurement, reporting and verification (MRV) systems for REDD+. *Carbon Balance Manage*, 12, 9. DOI: <https://doi.org/10.1186/s13021-017-0078-9>.
- MODIS Web. (2023). Retrieved from <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/>.
- Nandasena, W. D. K. V., Brabyn, L., Serrao-Neumann, S. (2022). Using Remote Sensing for Sustainable Forest Management in Developing Countries. In: *The Palgrave Handbook of Global Sustainability*. Palgrave Macmillan, Cham. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-38948-2_35-1.
- Nitoslawski, S. A., Wong-Stevens, K., Steenberg, J. W. N., Witherspoon, K., Nesbitt, L., & Konijnendijk van den Bosch, C. C. (2021). The digital forest: Mapping a decade of knowledge on technological applications for forest ecosystems. *Earth's Future*, 9, e2021EF002123. <https://doi.org/10.1029/2021EF002123>.
- Open Register of Permits for Timber Harvesting. (2022). Retrieved from <https://lk.ukrforest.com/forest-tickets/index>.
- Public Cadastral Map of Ukraine. (2023). Retrieved from <https://map.land.gov.ua/>.
- Sakhno, Y. Yu., Tereshchuk, O. I., & Yanchenko, O. P. (2019). Carrying out geosystem monitoring of felling forest near the Chernigiv region. *Technical sciences and technologies*, 2(16), 181–189. DOI: 10.25140/2411-5363-2019-2(16)-181-189 (In Ukrainian).
- Sentinel-hub EO-Browser. (2023). Retrieved from <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>.
- Shumilo, L., Yailymov, B., Lavreniuk, M., & Bilokonska, Y. (2020). Remote Sensing Approaches for Deforestation Identification in Ukraine. (2020) IEEE 5th International Symposium on Smart and Wireless Systems Within the Conferences on Intelligent *Data Acquisition and Advanced Computing Systems* (IDAACS-SWS). DOI:10.1109/idaacs-sws50031.2020.9297054.
- State Forest Resources Agency. (2022). Protection of forests from illegal logging. Retrieved from <https://forest.gov.ua/napryamki-diyalnosti/lisove-gospodarstvo/ohorona-i-zahist-lisiv/ohorona-lisiv-vid-nezakonnih-rubok>.
- Yan Gao, Margaret Skutsch, Jaime Paneque-Gálvez and Adrian Ghilardi (2020) Remote sensing of forest degradation: a review. *Environmental Research Letters*, 15, 103001. DOI: 10.1088/1748-9326/abaad7.

References

METHODOLOGY FOR FOREST LOSS ASSESSMENT USING GIS TECHNOLOGIES

S. I. Horelyk, D. K. Saul-Hoze, R. S. Sych

National Aerospace University "Kharkiv Aviation Institute", Kharkiv, Ukraine

One of the environmental problems in Ukraine is the illegal use of forest resources, specifically unauthorized forest logging. According to the State Forest Resources Agency, the volumes of forest violations reach tens, and sometimes thousands, of cubic meters of timber per year. Therefore, an important task is to accurately determine the areas of illegal logging. There are many methods for identifying this violation, which can be divided into two main groups: contact and remote sensing methods. Contact methods allow for on-site determination of the fact of illegal forest logging, but they require significant material and time costs. Among the available contact data, it is worth mentioning the open Register of permits for timber harvesting and the "Public Cadastral Map" geospatial portal, which allows for determining the legality of logging activities. Remote sensing data enable the localization of deforestation areas and the determination of their geometric characteristics with minimal time and material costs, but they have a number of drawbacks associated with weather conditions and the ambiguous interpretation of satellite-based research methods. Combining contact and remote sensing data with subsequent analysis is advisable using geoinformation systems and technologies. Geoinformation technologies allow for the rapid processing of large volumes of contact and remote sensing data, the creation of cartographic models for their further analysis and interpretation. Therefore, the comprehensive use of contact and remote sensing research methods will enable the prompt identification of deforested areas, determination of their geometric characteristics, and their legality. The developed methodology for identifying forest logging using GIS technologies involves the comprehensive use of open data from public portals on the availability of logging permits, satellite images from the Sentinel-2 satellite, and ArcGIS software with spatial analysis tools from ArcToolbox. The practical implementation of the developed methodology was carried out for the entire Kharkiv region. A total of 3,299 instances of logging were identified, of which 1,977 were carried out between 2008 and 2021. During the same period, 648 instances of logging without permits were determined.

Keywords: Forest cutting, NDVI index, GIS technologies, Sentinel-2, orthophotomap, interpretation, ArcGIS.

Рукопис статті отримано 16.04.2023

Надходження остаточної версії: 12.06.2023

Публікація статті: 29.06.2023