

Ю. Р. Луста¹, А. Л. Щупак²

¹Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-8832-8710>;

²Національний лісотехнічний університет України, м. Львів, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-4032-8436>;

ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ ДЛЯ ОЦІНКИ ВПЛИВУ НА ҐРУНТОВУ ПОВЕРХНЮ МОБІЛЬНИХ МАШИН ПІД ЧАС ЗАГОТІВЛІ ДЕРЕВИНИ

Анотація. Проаналізовано перспективність впровадження систем комп'ютерного зору для моніторингу екологічних наслідків експлуатування лісових машин. Обґрунтовано доцільність переходу від традиційних польових вимірювань до інноваційних технологій дистанційного зондування, зокрема мобільного лазерного сканування та фотограмметрії. Описано можливості застосування алгоритмів глибокого навчання моделей U-Net та YOLO для автоматизації ідентифікації технологічних колій та їхніх характеристик у реальному часі. Визначено головні технічні обмеження та потенціал інтеграції візуальних систем із даними CAN-шини для створення карти екологічного ризику.

Ключові слова: комп'ютерний зір, LiDAR, утворення колії, U-Net, YOLO, лісові машини

Інтенсивне використання лісових машин під час заготівлі деревини супроводжується значним механічним впливом на ґрунтову поверхню. Основними проявами такого впливу є формування технологічних колій, ущільненні ґрунту, порушенні мікрорельєфу та зміні водно-повітряного стану верхніх шарів ґрунту [1, 2]. Особливо небезпечними такі процеси є на перезволожених, слабконесних і неоднорідних ґрунтах, де багаторазові проїзди одним слідом можуть спричиняти швидке накопичення залишкових деформацій [3]. На рис. 1 схематично представлено механізм утворення колії внаслідок вертикального навантаження рушія та зсуву часток ґрунту. Особливо критичним є те, що за несприятливих умов (надмірна вологість, значний ухил поверхні та відсутність рослинного покриву) перевищення межі залишкової деформації трансформується у прогресуючу водну ерозію, спричиняючи інтенсивне поглиблення колії та руйнування ґрунту.

Оперативний моніторинг пошкоджень ґрунтової поверхні після роботи лісових машин є важливою складовою екологічного оцінювання лісозаготівельних робіт та обґрунтування допустимої кількості проїздів машин технологічними смугами.



Рисунок 1 – Стадії деградації ґрунтової опорної поверхні: а – поверхня пряма і неушкоджена; б – початкова глибина колії менша за екологічну межу; в – перевищення екологічної межі є критичним порогом, за яким посилюється інтенсивна водна ерозія

Для коректного переходу від опису окремої технологічної колії до ширшої екологічної оцінки необхідно розглядати колієутворення як один із проявів геомеханічного порушення ґрунтової поверхні.

У межах екологічного оцінювання наслідків роботи лісових машин найбільше значення мають механічні порушення ґрунтової поверхні, оскільки вони безпосередньо пов'язані з деформацією опорного шару, утворенням технологічних колій і зміною мікрорельєфу. За характером прояву такі порушення доцільно умовно об'єднувати в чотири групи: деформації, ерозійні прояви, насипи та виїмки. За формою локалізації вони можуть бути точковими, лінійними, площинними або об'ємними. Така класифікація є важливою для подальшої автоматизованої інтерпретації зображень і хмар точок, оскільки різні типи порушень потребують відмінних алгоритмів виявлення, сегментації та кількісного оцінювання [1, 4].

Традиційний контроль стану лісової ділянки після виконання лісозаготівельних робіт здебільшого ґрунтується на вибіркових польових вимірюваннях, візуальному огляді пошкоджень місцевості та визначенні параметрів плану та поперечних профілів шляхів первинного лісотранспорту (трелювання) в їхніх характерних місцях (рис. 2) [2].

Такі методи дають змогу отримати загальне уявлення про наслідки дії лісових машин на ґрунтову поверхню, однак їхня інформативність обмежується дискретним характером вимірювань. Вони переважно фіксують уже сформований результат пошкодження, але не відтворюють безперервну просторову зміну глибини, ширини та профілю колії. Через це оцінювання значною мірою залежить від кількості точок вимірювання, неоднорідності ґрунтових умов і суб'єктивності польового спостереження.

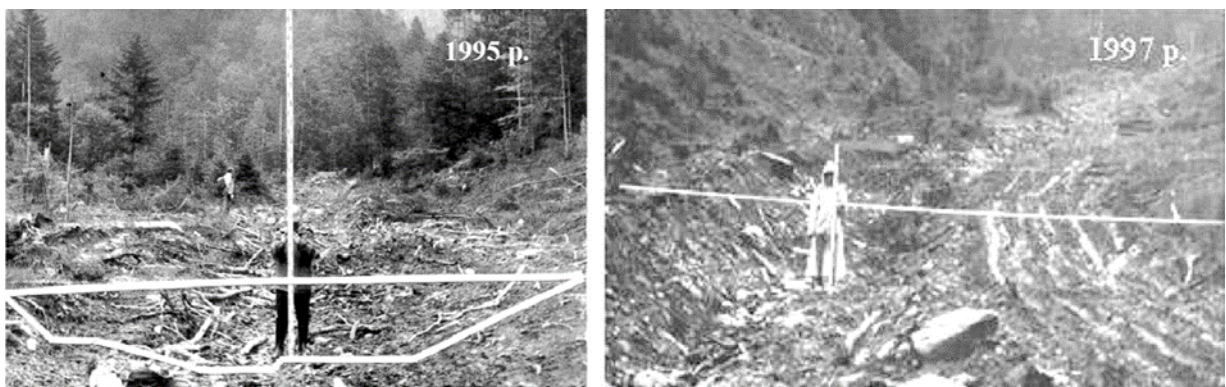


Рисунок 2 – Заміри зміни колії у Надвірнянській ДЛГ:
Хрипелівське лісництво, кв. 18, виділ 6 [2]

Саме ця методична обмеженість формує потребу в переході до цифрових засобів просторового моніторингу, зокрема систем комп'ютерного зору, фотограмметрії та LiDAR-сканування.

Прикладом такого переходу є сучасні підходи до контролю якості лісозаготівельних операцій у країнах із розвиненим машинним лісозаготівельним виробництвом. Зокрема, у Фінляндії методи моніторингу параметрів лісозаготівельного сліду поєднують традиційні польові вимірювання з дистанційними способами аналізу, комп'ютерним зором і алгоритмами оброблення хмар точок [5].

Такий підхід до моніторингу охоплює кілька груп показників: щільність залишеного деревостану, обсяг вилюченої деревини, пошкодження стовбурів і підросту, параметри ґрунтової поверхні (глибина та ширина технологічних колій), а також частку площі пошкодженої поверхні. Таким чином, система оцінювання комплексно поєднує лісівничі, екологічні й експлуатаційні чинники. Для аналізу взаємодії лісових машин із ґрунтом найбільший інтерес становлять саме морфометричні характеристики колій, оскільки вони відображають сумарний результат вертикального навантаження, циклічних проїздів, зсуву ґрунту та його залишкових деформацій.

Отже, головним недоліком ручного польового контролю є невідповідність між локальним характером вимірювань і просторовою складністю пошкоджень ґрунтової поверхні. Для систематизації можливих підходів до оцінювання стану лісових ділянок доцільно порівняти польові, статистичні та дистанційні методи контролю (табл. 1).

Таблиця 1

Порівняльна характеристика методів контролю стану лісових ділянок [6]

Група методів	Сутність	Переваги	Обмеження для дослідження колії
Польовий контроль	Закладання фіксованих пробних площ і вимірювання показників на місцевості	Простота, безпосередня перевірка, можливість оцінити пошкодження	Обмежена просторовість, висока залежність від кількості пробних площ
Статистичний контроль	Розрахунок середніх значень, дисперсії, стандартного відхилення та довірчих інтервалів	Дає змогу оцінити надійність результатів	Не пояснює фізичний механізм утворення колії
Дистанційне зондування	Використання БПЛА, аерознімання, фотограмметрії	Просторове покриття ділянки, можливість порівняння до/після	Потребує валідації польовими вимірюваннями
LiDAR / хмари точок	Побудова тривимірної моделі поверхні та виявлення колій	Висока деталізація, можливість визначати профіль і об'єм деформації	Потребує складнішої обробки даних і фільтрації рослинності

Порівняння методів свідчить, що жоден із них окремо не забезпечує повного циклу оцінювання: польові вимірювання потрібні для валідації, статистичні методи — для оцінювання достовірності, а дистанційне зондування та LiDAR — для просторового відтворення геометрії колій. Тому найбільш обґрунтованим є комбінований підхід, у якому комп'ютерний зір виконує роль інструмента автоматизованого виявлення й кількісного опису пошкоджень.

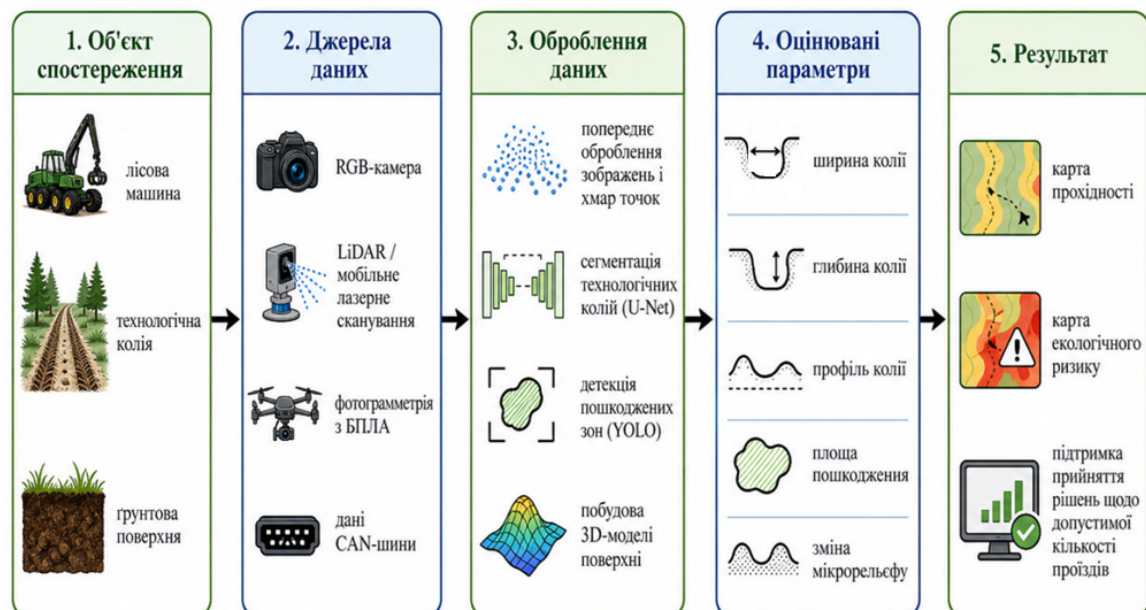


Рисунок 3 – Схема застосування систем комп'ютерного зору для оцінювання впливу лісових машин на ґрунтову опорну поверхню під час заготівлі деревини

Схема відображає послідовний перехід від об'єкта спостереження та джерел даних до автоматизованого оброблення зображень, хмар точок і бортових параметрів машини.

Кінцевим результатом такого аналізу є формування просторово прив'язаних інформаційних продуктів: карти прохідності, карти екологічного ризику та рекомендацій щодо допустимої кількості проїздів лісових машин одним технологічним слідом. Практична цінність підходу полягає в можливості оперативного коригування маршрутів руху, обмеження повторних проїздів на ділянках із низькою тримною здатністю ґрунту та вибору менш руйнівних режимів роботи машин [3, 5, 6].

Водночас перехід від концептуальної схеми цифрового моніторингу до її практичного використання в умовах лісосіки потребує врахування низки обмежень. Вони пов'язані не лише з технічними параметрами сенсорів, а й із природно-кліматичною мінливістю середовища, складністю рельєфу, наявністю води в коліях і потребою в обробленні великих масивів даних у режимі, наближеному до реального часу.

Першу групу обмежень становлять перешкоди та вплив гідрологічного фактора: Однією з найскладніших проблем залишається явище дзеркальності водної поверхні. Колії, заповнені водою, стають «сліпими зонами» для стандартних інфрачервоних LiDAR-сканерів та звичайних фотокамер, оскільки промінь або відбивається від поверхні, не фіксуючи дно, або поглинається. Потенційним шляхом вирішення є впровадження батиметричних LiDAR-систем, що працюють у зеленому спектрі світла, які здатні проникати крізь товщу води. Проте на даному етапі такі пристрої характеризуються високою вартістю, значними габаритами та енергоспоживанням, що робить їх важкодоступними для встановлення на мобільні лісові платформи чи БПЛА [7].

Другу групу обмежень формує потреба в значних обчислювальних ресурсах: Оброблення масивів даних, що налічують мільйони одиниць, у режимі реального часу вимагає колосальних ресурсів. Для забезпечення миттєвої реакції автономної машини на зміну рельєфу необхідне використання потужних процесорів безпосередньо на борту техніки. Це створює додаткові виклики щодо охолодження обладнання, захисту від вібрацій та енергоефективності систем штучного інтелекту [8].

Третя група обмежень пов'язана з кліматичними та сезонними умовами експлуатації лісових машин: За умов від'ємних температур фізико-механічні властивості ґрунту кардинально змінюються. Промерзання забезпечує аномально високу тримну здатність, яку сучасні моделі машинного навчання, треновані на літніх даних, можуть не враховувати, помилково прогнозуючи високий ризик занурення лише на основі показників вологості. Окремим бар'єром є сніговий покрив, який повністю нівелює мікрорельєф, роблячи оптичні системи комп'ютерного зору недієздатними для ідентифікації прихованих нерівностей чи пнів [9].

Висновки. Застосування систем комп'ютерного зору для оцінювання впливу лісових машин на ґрунтову поверхню є перспективним напрямом удосконалення екологічного моніторингу під час заготівлі деревини. На відміну від традиційних маршрутних і точкових вимірювань, фотограмметрія з БПЛА та мобільне лазерне сканування дають змогу отримувати просторово деталізовані дані про глибину, ширину, профіль і площу пошкодження технологічних колій.

Використання алгоритмів глибокого навчання, зокрема U-Net для семантичної сегментації та YOLO для детекції об'єктів і пошкоджених зон, створює передумови для автоматизованого аналізу стану ґрунтової поверхні. Поєднання візуальних даних із параметрами CAN-шини машини може підвищити інформативність моніторингу, оскільки дозволяє пов'язувати геометрію колії з режимами руху, навантаженням і витратою потужності.

Практичним результатом такого підходу може бути формування карт прохідності, карт екологічного ризику та рекомендацій щодо допустимої кількості проїздів одним технологічним слідом. Водночас ефективність упровадження таких систем залежить від здатності враховувати водонаповнені колії, сезонну зміну тримної здатності ґрунту,

наявність снігового покриву та потребу в обробленні великих масивів даних у режимі, наближеному до реального часу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Библиук Н.І., Стиранівський О.А., Герис М.І., Бойко М.М., Олійник М.І., Щупак А.Л. Дослідження впливу гусеничних та колісних трелювальних тракторів на лісове середовище в умовах Сколівських Бескидів. *Наук вісн НЛТУ України*. 2016. 26(1) с 196-203.
2. Библиук Н.І., Стиранівський О.А., Бойко М.М., Щупак А.Л. Шкідливий вплив лісгосподарської діяльності на довкілля та шляхи його мінімізації. *Наук вісн НЛТУ України*. 2008. 18(3) с 13-22.
3. Machuga O, Shchupak A, Styranivskiy O, Krilek J, Helexa M, Kováč J, Kuvik T, Mancel V, Findura P. Field and laboratory research of the rut development process on forest roads. *Forests*. 2024;15(1):74. doi:10.3390/f15010074.
4. Стиранівський О. А., Стиранівський Ю. О. Природоохоронні засади транспортного освоєння гірських лісових територій. - Львів: РВВ НЛТУ України, 2010. – 208 с.
5. Labelle ER, Hansson L, Högbom L, et al. Strategies to mitigate the effects of soil physical disturbances caused by forest machinery: a comprehensive review. *Curr For Rep*. 2022;8(1):20-37. doi:10.1007/s40725-021-00155-6.
6. Sagar A, Pohjala J, Muhojoki J, et al. Utilising mobile laser scanning point clouds to assess harvesting quality in thinning stands. *Sci Remote Sens*. 2026;13:100374. doi:10.1016/j.srs.2026.100374
7. Szafarczyk A, Toś C. The Use of Green Laser in LiDAR Bathymetry: State of the Art and Recent Advancements. *Sensors*. 2023; 23(1):292. <https://doi.org/10.3390/s23010292>
8. Xie J, Zhou X, Cheng L. Edge computing for real-time decision making in autonomous driving: review of challenges, solutions, and future trends. *Int J Adv Comput Sci Appl*. 2024;15(7). doi:10.14569/IJACSA.2024.0150759
9. Katarov V, Syuneyev V, Kolesnikov G. Analytical Model for the Load-Bearing Capacity Analysis of Winter Forest Roads: Experiment and Estimation. *Forests*. 2022; 13(10):1538. <https://doi.org/10.3390/f13101538>