



Наукові праці Лісівничої академії наук України
Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine

<http://fasu.nltu.edu.ua>
<https://doi.org/10.15421/412422>
Article received 2024.03.23
Article accepted 2024.10.18

ISSN 1991-606X print
ISSN 2616-5015 online
@ ✉ Correspondence author
Natalia Lusiv
natalusiv@gmail.com

103 General Chuprynka st., Lviv, 79057, Ukraine

УДК 630*3/8:528.93

Використання геоінформаційних систем як інноваційних інструментів стратегії розвитку та підвищення ефективності діяльності суб'єктів лісового господарства

Н. Г. Луців¹, П. В. Чухна²

Розглянуто напрями використання потенціалу геоінформаційних систем (ГІС) для інтеграції екологічних та економічних параметрів лісокористування у процеси управління лісами.

Результати дослідження підтвердили, що ГІС забезпечують високу точність моніторингу стану лісів, автоматизацію процесів інвентаризації лісових ресурсів, оцінювання біорізноманіття та вартості екосистемних послуг. Застосування супутникових даних Sentinel-2 і Landsat у поєднанні з індексами NDVI та EVI відобразило можливість знаходження критичних зон лісових територій для прийняття управлінських рішень щодо збереження біорізноманіття. Аналіз трьох сценаріїв управління (інтенсивна лісозаготівля, сталий розвиток і консервація) виявив, що стратегія сталого розвитку забезпечує оптимальний баланс між економічною та екологічною ефективністю лісокористування, зберігаючи до 80% біорізноманіття і підвищуючи нагромадження вуглецю на 10%.

Економічна ефективність використання ГІС відображається через отримання ефектів від інтеграції просторових даних у процеси автоматизованого збору, обліку, економічного аналізу та підтримки управління. Застосування ГІС для аналізу і прогнозування сприяє збільшенню доходів лісокористувачів завдяки точному оцінюванню запасів лісу, встановленню економічно вигідних територій для заготівлі деревини, скороченню витрат на логістику.

Акцентовано увагу на значенні отриманих результатів для інтеграції екологічних та економічних параметрів у стратегію діяльності суб'єктів лісогосподарської діяльності, зокрема у міжнародні ініціативи, таких як REDD+.

Ключові слова: цифрові технології; управлінські рішення; екологічні параметри; економічний ефект; витрати; доходи; сталий розвиток; лісові ресурси.

Вступ (Introduction). Питання сталого розвитку лісових екосистем є одним із пріоритетних, адже від їхнього стану залежить екологічна рівновага планети, якість та рівень життя людства. На сьогодні суб'єкти лісового господарства зіштовхуються з численними викликами, насамперед, обмеженістю ресурсів, необхідністю дотримання принци-

пів сталого розвитку, підвищенням продуктивності та зниженням витрат. У цьому контексті впровадження інноваційних технологій стає необхідністю, адже традиційні підходи до управління лісовими ресурсами не враховують усіх просторових аспектів, що призводить до зниження ефективності діяльності суб'єктів лісової галузі.

¹ Луців Наталія Григорівна – член-кореспондент Лісівничої академії наук України, кандидат економічних наук, доцент кафедри економіки, туризму і рекреації. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: natalusiv@gmail.com ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5588-7778>

² Чухна Павло Васильович – здобувач програми доктора філософії кафедри економіки, туризму і рекреації. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: chukhna.pavlo@nltu.lviv.ua ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-1789-792X>

В Україні питаннями цифрового моніторингу лісових ресурсів займалися низка дослідників (Turner et al., 2007; Бурштинська, Поліщук, Ковальчук, 2013; Цуняк, Часковський, Король, 2013; Слободяник, 2014; Yun, Kang, Kim, & Kang, 2019; Миронюк, 2020; Zhu, & Song, 2020). На сьогодні є багато публікацій у цьому напрямі, однак питання застосування геоінформаційних систем для визначення екологічних та економічних параметрів лісокористування і впровадження їх у практику діяльності лісокористувачів все ще залишається недостатньо вивченим.

Мета досліджень полягала в аналізі використання геоінформаційних систем як інноваційного інструмента сталого розвитку лісового господарства України. Для досягнення поставленої мети проаналізовано сучасні світові підходи щодо використання геоінформаційних систем в управлінні лісовими ресурсами; оцінено можливості застосування ГІС для аналізу еколого-економічних параметрів використання лісів; запропоновано основні напрями подальших досліджень щодо використання ГІС в управлінні лісовими ресурсами України.

Об'єкти та методика дослідження (Objects and methods). *Об'єкт дослідження* – система управління лісовими ресурсами, зокрема її інформаційно-технічна складова, що включає використання геоінформаційних систем. *Предмет дослідження* – процеси, пов'язані з використанням геоінформаційних систем у практиці управління лісовими ресурсами.

Під час виконання завдань дослідження використано такі методи: теоретичний – для узагальнення інформації; порівняння – для аналізу результатів моделювання різних практик лісокористування; графічний (таблиці) – для представлення даних дослідження. Інформаційною базою слугували наукові публікації щодо застосування ГІС у сфері менеджменту лісів.

Результати дослідження (Results). Геоінформаційні системи (ГІС) – це цифрові технологічні інструменти, які підтримують збір, відображення та аналіз просторової інформації. На сьогодні вони є невід'ємною частиною менеджменту лісів, оскільки здатні забезпечити високоточний моніторинг та автоматизований збір даних щодо стану лісових ресурсів, здійснення їх аналізу, а також моделювання різних сценаріїв використання та управління (Meggy et al., 2023). Завдяки інтеграції даних із супутникових знімків, безпілотних літальних апаратів, польових обстежень та інших джерел, ГІС-технології дають змогу отримувати комплексні відомості про стан лісів у режимі реального часу. Це підвищує об'єктивність оцінювання економічних, екологічних і соціальних аспектів лісокористування та сприяє прийняттю ефективних управлінських рішень.

Розглянемо основні напрями використання ГІС у сучасній практиці управління лісами.

Інвентаризація і моніторинг лісів. У США в рамках Програми інвентаризації та аналізу лісів (FIA) здійснюється розробка схеми постстратифікації з використанням ГІС (Westfall, & Randall, 2013). На першому етапі (фаза 1) використовують дані, зібрані супутниковим зондуванням (Sentinel-2, Landsat), аерофотознімки, дані з безпілотників та результати спектрального аналізу лісового покриття засобами ГІС. Ця схема допомагає зменшити дисперсію оцінок, що підвищує точність аналізу шляхом стратифікації території на основі однорідних характеристик лісового покриття, дає змогу ранжувати зони господарського використання лісів.

Результати досліджень А. А. Мельника, М. О. Ячнюка (2022) підтверджують ефективність використання ГІС для проведення інвентаризації лісів. Автори зазначають, що за допомогою космічних знімків Sentinel 2 з архіву Геологічної служби США у ГІС – QGIS можна створювати векторизовані шари окремих територій, вивчати наявність та особливості ділянок зрубів лісів. Такий аналіз важливий для оцінювання масштабів втрат лісового покриття та прийняття рішень щодо його відновлення.

Оцінювання якості лісів. Супутникові знімки Sentinel-2 і Landsat можна використовувати для розробки інтерактивних карт, які відображають «гарячі точки» біорізноманіття та показують стан якості лісів. Зокрема, деталізовані просторові карти динаміки змін лісових територій, створені на основі даних Landsat, застосовують для визначення регіонів із високим рівнем деградації лісів (Hansen et al., 2013). Ці карти можна використовувати для планування лісовідновлювальних заходів та визначення пріоритетних територій для збереження лісових екосистем.

Аналіз ГІС, здійснений на основі індексів вегетації NDVI та EVI, широко використовують для оцінювання змін густоти лісового покриття, що дає змогу встановити стан рослинності та продуктивність екосистем. Проведене оцінювання за допомогою індексу вегетації NDVI на території Полісся показало, що 15% лісових територій цього регіону перебувають у стані деградації та потребують термінових відновлювальних заходів (Лялько та ін., 2018).

Поряд з NDVI (простий показник кількості фотосинтетичної активної біомаси), використовують індекс EVI (розширений вегетаційний показник). Методика розрахунків EVI додатково враховує рівень атмосферних впливів, що підвищує точність його оцінювання. Так дані, отримані і опрацьовані за допомогою ГІС на основі супутникових знімків Landsat з визначенням індексу EVI у тропічних високогірних регіонах, показали ефективність використання цієї методики для аналізу зміни лісового покриття, оцінювання стану деревостанів та ідентифікації «гарячих точок» біорізноманіття (Goparaju, & Sinha, 2016). Адаптація цих методів

до українських умов дасть змогу врахувати специфіку національних екосистем і впливи клімату.

Стійкість громадських лісів забезпечується шляхом збереження їхнього потенціалу. R. Safe'i, & A. Ure (2022) вказують на можливість розробки карт здоров'я дерев з використанням ГІС-технологій. Це допоможе швидше ідентифікувати зони лісів, які потребують втручання. Такий підхід дасть змогу вчасно здійснювати профілактичні заходи (знищення шкідників, запобігання розвитку хвороб тощо), що підвищить продуктивність лісів, їхню стійкість та знизить втрати.

Оцінювання вартості екосистемних послуг. W.R. Turner et al. (2007) підкреслюють важливість використання ГІС для оцінювання екосистемних послуг, насамперед регулювання водних ресурсів, нагромадження вуглецю та збереження біорізноманіття. Застосування ГІС-технологій дає змогу не лише кількісно оцінювати ці послуги, але й створювати моделі прогнозування їхнього майбутнього стану залежно від змін клімату та впливу людської діяльності.

Методологія оцінювання прямої вартості екосистемних послуг може базуватися на методах, які передбачають використання ГІС для збору даних, виконання просторового аналізу та картування економічних витрат екосистемних послуг. Такий підхід було застосовано в Китаї (округ Тяньтай) на території 1423,8 км² (Chen, Li, & Wang, 2009). Окремі компоненти екосистемних послуг (сільсько-господарська і лісова продукція, туристичні послуги) в районі дослідження було нанесено на карту у вигляді шарів даних в ГІС, причому кожен шар містив вартісні значення для кожного осередку розміром 25 м². В результаті такого підходу було встановлено просторову вартість визначених компонентів екосистемних послуг.

Оцінювання різних практик управління лісами. Такі дослідження передбачають аналіз та порівняння підходів до використання, відновлення і збереження лісових ресурсів з урахуванням їх екологічної, економічної та соціальної ефективності. M.C. Hansen et al. (2013) здійснили математичне моделювання, яке включало використання симуляційних моделей для оцінювання впливу різних сценаріїв управління лісами на ключові екологічні та економічні показники лісокористування. Для еколого-економічного моделювання сценаріїв управління лісами використано дані супутникового зондування та просторові моделі ГІС, які враховували біорізноманіття, нагромадження вуглецю та економічну вигоду. Для валідації моделей автори застосували методи перехресної перевірки, порівнюючи результати прогнозування з даними польових досліджень. У випадках значних розбіжностей вносили корективи до входних параметрів моделей, таких як точність класифікації земного покриття або розрахунки біомаси.

Здійснений M.C. Hansen et al. (2013) аналіз охоплював три сценарії управління лісами: інтенсивну лісозаготівлю, сталий розвиток і консервацію.

Інтенсивна лісозаготівля. Ця практика ведення лісового господарства зосереджена на максимальному використанні лісових ресурсів з метою забезпечення короткотермінового економічного результату. Встановлено, що такий підхід призводить до значних втрат екосистемних послуг, включаючи зниження рівня біорізноманіття і нагромадження вуглецю. Для прикладу, на території Полісся інтенсивна заготівля лісів спричинила деградацію 30% водно-болотних екосистем, що значно вплинуло на регіональну екологічну стабільність.

Сталий розвиток. Така практика здатна забезпечити баланс між економічною ефективністю та екологічною стійкістю. Основними результатами сталого ведення лісового господарства є збереження «гарячих точок» біорізноманіття; зростання нагромадження вуглецю; забезпечення стабільного економічного доходу від надання екосистемних послуг. За результатами досліджень M.C. Hansen, et al. (2013) встановлено, що у Карпатах використання сталих практик сприяло збереженню 80% «гарячих точок» біорізноманіття. Просторові карти, створені за допомогою ГІС, допомогли визначити регіони з найвищим потенціалом для поглинання вуглецю, які мають пріоритет для відновлення. Наприклад, у Карпатах ідентифіковано ділянки з високою густотою ялинових лісів, в яких прогнозується зростання нагромадження вуглецю на 30%. При цьому, економічна ефективність ведення сталих практик є стабільною.

Консервація. Стратегія управління орієнтована на збереження природного стану лісових екосистем. Такий підхід сприяє зростанню нагромадження вуглецю і збереженню «гарячих точок» біорізноманіття. Так, на території Полісся реалізація сценарію консервації зменшила антропогенний вплив на водно-болотні угіддя, що сприяло відновленню їхньої природної динаміки. При цьому варто зазначити, що економічний ефект за такої практики управління лісовими ресурсами є мінімальним внаслідок обмеження господарської діяльності. Результати узагальненого аналізу подано в табл. 1.

Отримані результати засвідчують, що сценарій сталого розвитку є оптимальним з погляду балансу між екологічною та економічною ефективністю. Практика інтенсивної лісозаготівлі може застосовуватися лише у регіонах із низькою екологічною цінністю, тоді як консервація є найбільш доцільною для територій із високим рівнем біорізноманіття та значним нагромадженням вуглецю.

Результати аналізу визначених практик підкреслюють важливість урахування як екологічних, так і економічних факторів у прийнятті управлінських рішень.

Оцінювання економічного ефекту сталих практик лісокористування. За допомогою методів умовного оцінювання надано оцінку економічної цінності послуг лісових екосистем, включаючи нагромадження вуглецю (Abdelrhman, Almaleeh,

& Elshareef, 2022). Результати їхнього дослідження продемонстрували, що сталі практики управління лісами можуть значно підвищити рівні нагромадження вуглецю, що підтверджує необхідність їх впровадження для зниження рівня викидів парникових газів.

W. Stefanoni et al. (2023) зазначають, що використання ГІС для оцінювання нагромадження вуглецю в лісах Центральної Італії дало змогу визна-

чити пріоритетні регіони для здійснення лісозаготівлі, які мають високий потенціал. Дослідження будувалося на основі застосування методу аналізу ієрархій (МАІ) в середовищі ГІС. Автори наголошують, що застосування МАІ в ГІС дає об'єктивну інформацію щодо отримання максимального економічного ефекту та мінімізації екологічної шкоди при плануванні лісозаготівель суб'єктами лісового господарства.

Таблиця 1. Ключові показники результативності за різними практиками управління лісовими ресурсами

Table 1. The Key Performance Indicators for Different Forest Resource Management Practices

Показник	Інтенсивна лісозаготівля	Сталий розвиток	Консервація
Нагромадження вуглецю (%)	Зменшення на 35%	Збільшення на 10%	Збільшення на 35%
Збереження біорізноманіття (%)	Зменшення на 50%	Збереження до 80%	Збереження до 90%
Економічна ефективність	Висока (короткотермінова)	Стабільна (довготермінова)	Низька

Н. Li, S. Liu, T. Cai (2022) запропонували методику вимірювання економічної вигоди від екосистемних послуг на основі інформаційної обробки бази великих даних, яка дає змогу оцінювати не лише економічну ефективність використання лісів, але й їхню екологічну та соціальну цінність для місцевих громад.

Важливу роль ГІС відіграють і в моделюванні економічних результатів діяльності суб'єктів лісокористування. У Румунії було проведено дослідження із застосуванням наземного лазерного сканування та ГІС для оцінювання потенційних економічних ефектів від використання лісових ресурсів (Cristea, & Josea, 2015). Це дослідження демонструє, що поєднання новітніх технологій з економічними методами дає змогу здійснити комплексне оцінювання цінності лісів для суспільства.

У Фінляндії проведено дослідження щодо можливостей оцінювання економічного потенціалу виробництва енергії з відходів деревообробної галузі (кусові відходи, деревна тріска) та паливної

продукції лісозаготівельних підприємств (низькосортна продукція рубок проріджування, гілки, пні тощо) з використанням методів на основі ГІС (Nivala et al., 2016). Було складено регіональну карту балансу енергії лісової мережі, яка враховувала економічні, технічні та екологічні обмеження під час розрахунку різних сценаріїв попиту і пропозиції на паливну продукцію. Такий метод розрахунку потенціалу паливної продукції дає змогу підвищити ефективність діяльності суб'єктів лісового господарства та є корисним для складання програм і планів енергозабезпечення населення і комунальних підприємств на рівні місцевої, муніципальної та регіональної влади, як в коротко-, так і в довготерміновій перспективі.

Отже, завдяки інтеграції просторових даних та їх обробки в середовищі ГІС можна визначити оптимальну стратегію розвитку лісового господарства, скеровану на отримання максимального екологічного та економічного ефектів.

Основні складові економічних ефектів від застосування ГІС систематизовано в табл. 2.

Таблиця 2. Очікувані економічні результати від впровадження ГІС у практику лісогосподарської діяльності

Table 2. Expected economic results from the introduction of GIS into forestry practice

Результати	Процеси
1	2
Зниження витрат на моніторинг стану лісових екосистем	Дистанційне зондування та регулярний моніторинг дають змогу зменшити витрати на польові роботи зі збору необхідних даних.
Зниження витрат на інвентаризацію лісів	Автоматизація збору та аналізу даних скорочує час і трудомісткість. Зростає продуктивність.

1	2
Скорочення витрат на проведення рубок	Завдяки аналізу просторових даних можна оптимізувати маршрути транспортування деревини та місця вирубок, що підвищить ефективність логістичних процесів.
Підвищення рентабельності діяльності	Збільшення доходів за рахунок обсягу виробництва продукції (рубок на ділянках з найбільшим економічним потенціалом).
Збільшення доходів від реалізації нових видів продукції	Використання ГІС дає змогу створювати карти, аналітичні звіти та інші продукти для зовнішніх замовників.
Зниження ризиків	ГІС дають змогу моделювати природні катастрофи, такі як пожежі чи буреломи, а, отже, прогнозувати ризики та завчасно приймати заходи щодо їхнього уникнення.

Дискусія (Discussion). Інтеграція екологічних та економічних даних, отриманих за допомогою ГІС, у процеси управління лісами дає змогу досягти сталого розвитку лісового господарства.

Національні дослідження зосереджуються на адаптації ГІС-технологій до умов окремих регіонів. Інформаційною базою аналізу є супутникові дані Sentinel-2 і Landsat, карти біорізноманіття, а також результати польових досліджень у регіонах України (Лялько та ін., 2018; Мельник, Ячнюк, 2022; Мороз, Никитюк, 2019). Для оброблення зібраних дистанційним зондуванням даних використовують програмне забезпечення ArcGIS, QGIS та модулі InVEST, що дає змогу інтегрувати різні типи даних у єдину систему аналізу (Мельник, Ячнюк, 2022).

Однак, використання стаціонарних геоінформаційних систем, за їх значних переваг, має і низку обмежень. Серед них:

- *технічні обмеження* (обмежений доступ до даних, адже високоякісні дані з комерційних супутників можуть бути дорогими, а дешеві часто мають низьку роздільну здатність, що погіршує якість зображень);
- *екологічні фактори* (погода, сезонність, які впливають на точність моніторингу даних);
- *аналітичні обмеження* (аналіз результатів може бути складним і вимагати спеціалізованих знань у галузі дистанційного зондування, лісового господарства та геоінформатики);
- *економічні фактори* (високі витрати, адже розробка, впровадження та підтримка ГІС-систем вимагають значних фінансових ресурсів);
- *організаційні фактори* (необхідність підготовки спеціалізованих фахівців);
- *юридичні та етичні аспекти* (обмеження на використання даних через ліцензії або національні правила; ризик розголошення даних про приватні або захищені території).

Окремі дослідники (Суска, Полях, 2023) зазначають, що на сучасному етапі для дистанційного моніторингу лісів можна використовувати не тільки стаціонарні геоінформаційні системи (QGIS, SAGA та Google Earth), але й онлайн-ресурс Global Forest Watch (GFW). Веб-додаток GFW є простішим і зручнішим у використанні. Його перевагою є інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, швидка візуалізація даних, можливість спостереження за динамікою змін та оперативний аналіз інформації. Однак потрібно враховувати, що GFW є вузькоспеціалізованим інструментом, який має невеликий функціонал.

Результати дослідження підтверджують, що, незважаючи на певні обмеження, ГІС залишаються важливим інструментом системи сталого управління лісами, зокрема для проведення інвентаризації, моніторингу та масштабних досліджень щодо прогнозування розвитку лісового господарства на національному рівні. Вищої ефективності застосування ГІС можна досягнути при інтеграції з іншими методами, зокрема польовими дослідженнями, дронними зйомками та екологічним моніторингом.

Висновки (Conclusions). Підтверджено значний потенціал геоінформаційних систем у забезпеченні політики сталого управління лісовими ресурсами. ГІС ефективно інтегрують просторові, екологічні та економічні дані, що дає змогу аналізувати біорізноманіття, рівень нагромадження вуглецю та інші екосистемні параметри. Завдяки використанню супутникових даних Sentinel-2 і Landsat у поєднанні з індексами NDVI та EVI забезпечується висока точність моніторингу змін у лісових екосистемах, зокрема ідентифікація критичних зон для збереження біорізноманіття та оцінювання впливу прийнятих управлінських рішень.

Аналіз різних практик управління лісами (інтенсивна лісозаготівля, сталий розвиток, консер-

вація) продемонстрував суттєві відмінності у досягненні екологічної та економічної ефективності їх використання. Сценарій сталого розвитку забезпечує баланс між економічною вигодою та екологічною стійкістю, тоді як консервація є найбільш ефективною для збереження біорізноманіття і нагромадження вуглецю. Водночас інтенсивна лісозаготівля хоча й приносить короткотермінову економічну вигоду, проте негативно впливає на довготермінову стійкість екосистем.

Впровадження ГІС-технологій у лісове господарство може підвищити економічну ефективність діяльності лісокористувачів. Підтверджено можливість досягнення таких економічних ефектів: зниження витрат на моніторинг, інвентаризацію лісів, логістику рубок; зростання доходів від рубок на ділянках з найбільшим економічним потенціалом; збільшення доходів від нових видів продукції; зниження ризиків фінансових втрат через стихійні лиха, незаконні рубки; покращення якості управління.

Отримані результати узгоджуються з міжнародними дослідженнями щодо ефективності сталих практик управління лісами. Для прикладу, використання ГІС у глобальних ініціативах, таких як REDD+ (зменшення викидів від зрубів та деградації лісів), може сприяти підвищенню точності моніторингу щодо змін лісового покриву. Запропоновані підходи до оцінювання нагромадження вуглецю лісами та оцінювання біорізноманіття можуть бути адаптовані в Україні, як інноваційні інструменти досягнення стійкого розвитку регіонів з екологічними викликами. Це відкриває нові можливості для міжнародної співпраці та забезпечує універсальність використаних методів і підходів щодо оцінювання сталих практик лісокористування.

Подальші дослідження повинні зосереджуватись на розширенні географічної бази, включаючи екосистеми Лівобережної України та Південного Степу з оцінюванням соціальних аспектів лісокористування. Це дасть змогу створити загальнонаціональну базу даних, яка допоможе у визначенні пріоритетних зон для збереження, відновлення, використання та охорони лісових ресурсів і розвитку лісового господарства на засадах сталого розвитку.

Список літератури (References)

Бурштинська, Х. В., Поліщук, Б. В., Ковальчук, О. Ю. (2013). Дослідження методів класифікації лісів з використанням космічних знімків високого розрізнення. *Геодезія, картографія і аерофотознімки*, 78, 101-110. [Burshtynska, H. V., Polishchuk, B. V., & Kovalchuk, O. Yu. (2013). Investigation of forest classification methods using high-resolution space images. *Geodesy, cartography and aerial*, 78, 101-110. <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/20062>] (in Ukrainian)

Лялько, В. І., Єлістратова, Л. О., Апостолов, О. А., Ходоровський, А. Я., Чехній, В. М. (2018). Експрес-оцінка ерозійно небезпечних ділянок ґрунтового покриву на території України з використанням даних дистанційного зондування Землі з врахуванням кліматичних факторів та рослинності. *Доповіді Національної академії наук України*, 3, 87-94. [Lyalko, V. I., Yelistratova, L. A., Apostolov, O. A., Khodorovskiy, A. Y., & Chekhniy, V. M. (2018). Rapid assessment of erosion-prone areas of soil cover on the territory of Ukraine using remote sensing data with consideration of climatic factors and vegetation. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 3, 87-94. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2018.03.087>] (in Ukrainian)

Миронюк, В. В. (2020). *Інвентаризація рівнинних лісів України за даними супутникової зйомки*. Харків: АТ «Харківська книжкова фабрика «ГЛОБУС». [Mironyuk, V. V. (2020). Inventory of plain forests of Ukraine according to satellite imagery. Kharkiv: JSC "Kharkiv Book Factory GLOBUS"] (in Ukrainian)

Мельник, А. А., Ячнюк, М. О. (2022). Використання ГІС для моніторингу лісового покриву: приклад Чернівецької області. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія: Географічні науки*, 16, 32-39. [Melnik, A. A., & Yachniuk, M. O. (2022). Using GIS for forest cover monitoring: the case of Chernivtsi region. *Scientific Bulletin of Kherson State University. Series: Geographical sciences*, 16, 32-39. <https://doi.org/10.32999/ksu2413-7391/2022-16-3>] (in Ukrainian)

Мороз, В. В., Никитюк, Ю. А. (2019). Вуглецепоглинальна здатність соснових лісових насаджень Київського Полісся. *Захист і карантин рослин*, 65, 133-148. [Moroz, V., & Nykytiuk, Y. (2019). Carbon absorption ability of pine forest plantations in Kyiv Polissya. *Interdepartmental Thematic Scientific Collection of Phytosanitary Safety*, 65, 133-148. <https://doi.org/10.36495/1606-9773.2019.65.133-148>] (in Ukrainian)

Слободяник, М. П. (2014). Використання методів ДЗЗ та ГІС-технологій для моніторингу лісових ресурсів. *Вісник геодезії та картографії*, 1, 27-31. [Slobodyanik, M. P. (2014). Using remote sensing methods and GIS technologies for monitoring forest resources. *Bulletin of Geodesy and Cartography*, 1, 27-31. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/vgtk_2014_1_8] (in Ukrainian)

Суска, А. А., Полях, В. М. (2023). Застосування геоінформаційних технологій для моніторингу лісового покриву. *Планування та використання територій в контексті інклюзивного розвитку: матеріали Міжнарод. наук.-практ. конф., м. Харків: Державний біотехнологічний університет*, 284-286. [Suska, A. A., & Polyakh, V. M. (2023). Application of geoinformation technologies for forest cover monitoring. In *Planning and use of territories in the context of inclusive development: proceedings of International Scientific and practical Conference*, 284-286. Kharkiv: State Biotechnological University] (in Ukrainian)

- Цуняк, А.М., Часковський, О.Г., Король, М.М. (2013). Розподіл наземного вкриття Стрийсько-Сянської Верховини на основі супутникових знімків LANDSAT. *Науковий вісник НЛТУ України*, 23(14), 27-32. [Tsuniyak, A. M., Chaskovsky, O. G., & Korol, M. M. (2013). Distribution of the ground cover of the Stryj-Sian Verkhovyna on the basis of LANDSAT satellite images. *Scientific Bulletin of Ukrainian National Forestry University*, 23(14), 27-32. Retrieved from https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2013/23_14/27_Cun.pdf] (in Ukrainian)
- Abdelrhman, H.A., Almaleeh, T.A., & Elshareef, I.M.M. (2022). Economic Valuation of Ecosystem Services Provided by Dellanj Forest Using Contingent Valuation Methods. *Journal of Economics and Public Finance*, 8(4), 58-66. <https://doi.org/10.22158/jepf.v8n4p58>
- Chen, N., Li, H., & Wang, L. (2009). A GIS-based approach for mapping direct use value of ecosystem services at a county scale: Management implications. *Ecological Economics*, 68(11), 2768-2776. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.12.001>
- Cristea, C., & Jocea, A. (2015). Applications of Terrestrial Laser Scanning And GIS In Forest Inventory. *Journal of Applied Engineering Sciences*, 5(2), 13-20. <http://dx.doi.org/10.1515/jaes-2015-0016>
- Goparaju, L., & Sinha, D. (2016). Forest cover change analysis of dry tropical forests of Vindhyan highlands in Mirzapur district, Uttar Pradesh using satellite remote sensing and GIS. *Ecological Questions*, 22, 23-31. <https://doi.org/10.12775/EQ.2015.020>
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, F., Thau, D., Stehman, S. V., ... Townshend, J. R. G. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342(6160), 850-853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Li, H., Liu, S., & Cai, T. (2022). Measurement of Forest Ecological Benefits Based on Big Data. *Sustainability*, 14(12), 7248. <https://doi.org/10.3390/su14127248>
- Merry, K., Bettinger, P. Crosby, M., & Boston, K. (2023). *Geographic information system skills for foresters and natural resource managers*. Amsterdam: Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/C2020-0-03530-9>
- Nivala, M., Anttila, P., Laitila, J., Salminen, O., & Flyktman, M. (2016). A GIS-Based Methodology to Estimate the Regional Balance of Potential and Demand of Forest Chips Geographic Information System. *Journal of Geographic Information System*, 5, 633-662. <http://dx.doi.org/10.4236/jgis.2016.85052>
- Safe'i, R., & Upe, A. (2022). *Mapping of Tree Health Categories in Community Forests in Lampung Province*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 995(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/995/1/012004>. (in English)
- Stefanoni, W., Tocci, D., Latterini, F., Venanzi, R., Gaglioppa, P., Pari, L., & Picchio, R. (2023). A Preliminary Validation and Assessment of a GIS Approach Related to Precision Forest Harvesting in Central Italy. *Forests*, 14(1), 127. <https://doi.org/10.3390/f14010127>
- Turner, W. R., Brandon, K., Brooks, T. M., Costanza, R., Fonseca, A. B., & Portela, R. (2007). Global Conservation of Biodiversity and Ecosystem Services. *BioScience*, 57(10), 868-873. <https://doi.org/10.1641/B571009>
- Yun, H. J., Kang, D. J., Kim, D., & Kang, Y. (2019). A GIS-Assisted Assessment and Attribute-Based Clustering of Forest Wetland Utility in South Korea *Sustainability*, 11, 4632. <https://doi.org/10.3390/su11174632>
- Westfall, J. A., & Randall, S. M. (2013). A cover-based method to assess forest characteristics using inventory data and GIS. *Forest Ecology and Management*, 298, 93-100. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.02.036>
- Zhu, J., & Song, L. (2020). A review of ecological mechanisms for management practices of protective forests. *Journal of Forestry Research*, 32(2), 435-448. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01233-4>

The use of Geographic Information Systems as innovative tools for sustainable development strategies and enhancing the efficiency of forest sector entities

N. Lutsiv¹, P. Chukhna²

The article examines the ways of using the potential of Geographic Information Systems (GIS) for integrating ecological and economic parameters of forest use into forest management processes. The research methodology was based on the analysis of scientific publications on the application of GIS in forest management and comparison of various forest management practices.

The obtained results showed that GIS provides high accuracy in forest condition monitoring, automation of forest resource inventory processes, assessment and analysis of biodiversity and the cost of ecosystem services. It was found that the use of Sentinel-2 and Landsat satellite data combined with NDVI and EVI

¹ Lutsiv Nataliia – Corresponding Member of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine, PhD in Economics, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Economics, Tourism and Recreation. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynka st., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: natalusiv@gmail.com ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5588-7778>

² Chukhna Pavlo – PhD candidate at the Department of Economics, Tourism and Recreation. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynka st., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: chukhna.pavlo@nltu.lviv.ua ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-1789-792X>

indices in GIS systems allows for identifying critical biodiversity zones and making timely management decisions regarding the conservation and restoration of natural resources in these areas.

The study characterized the results of modeling various forest management scenarios. The models utilized satellite sensing data and GIS spatial models that took into account the level of biodiversity conservation, carbon accumulation, and economic benefits. The findings of ecological-and-economic modeling of three management scenarios (intensive logging, sustainable development, and conservation) demonstrated that the sustainable development strategy provides an optimal balance between economic and ecological efficiency in forestry while preserving up to 80% of biodiversity and increasing carbon accumulation by 10%. The intensive logging scenario showed the potential for rapidly achieving high profitability, but it showed a 35% reduction in carbon accumulation and a 50% decrease in forest biodiversity. The conservation scenario showed the best environmental results (up to 90% of forest biodiversity is preserved, and the level of carbon accumulation increases by 35%). However, the economic efficiency of conservation practices is low due to limited forest exploitation.

The economic efficiency of GIS for forestry entities is manifested through the positive effects of integrating spatial data into automated processes for data collection, accounting, economic analysis of forest resources, forecasting changes, and management support. It was found that GIS makes it possible to identify economically advantageous timber harvesting areas, reduce the costs of forest monitoring and inventory, assess the profitability of individual ecosystem service components, calculate the optimal amount of energy production, and minimize the loss of forest resources.

The study confirms that the use of GIS and mathematical modeling methods allows for achieving maximum economic benefits and developing measures to reduce the environmental damage from forest exploitation. The conclusions emphasize the importance of using GIS to integrate ecological and economic parameters into forestry strategies in order to enhance their efficiency, as well as for participation in international programs supporting sustainable forest management practices, such as REDD+.

Key words: Digital technologies; managerial decisions; ecological parameters; economic effect; costs; revenues; forest resources.