

УДК 911.52-043.86(23.071):502/504(477.8)
DOI <https://doi.org/10.32999/ksu2413-7391/2021-15-5>

Круглов І.С.,
доктор географічних наук, доцент,
завідувач кафедри фізичної географії
Львівський національний університет імені Івана Франка
ivan.kruhlov@lnu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-0814-0935

Смалійчук А.Д.,
кандидат географічних наук,
доцент кафедри фізичної географії
Львівський національний університет імені Івана Франка
anatoliy.smaliychuk@lnu.edu.ua
ORCID: 0000-0001-6294-6035

Часковський О.Г.,
кандидат сільськогосподарських наук, доцент,
доцент кафедри лісової таксації та лісовпорядкування
Національний лісотехнічний університет України
oleh.chaskov@ntu.edu.ua
ORCID: 0000-0002-2938-0524

Біланюк В.І.,
кандидат географічних наук, доцент,
декан географічного факультету
Львівський національний університет імені Івана Франка
volodymyr.bilanyuk@lnu.edu.ua
ORCID: 0000-0003-4472-8637

Притула Р.В.,
аспірант кафедри фізичної географії
Львівський національний університет імені Івана Франка
roman.prytula@lnu.edu.ua
ORCID: 0000-0003-2738-107X

Смалійчук Г.В.,
кандидатка географічних наук,
наукова співробітниця кафедри фізичної географії
Львівський національний університет імені Івана Франка
hanna.smaliichuk@lnu.edu.ua
ORCID: 0000-0003-3520-9966

ПЕРСПЕКТИВНА ЕВОЛЮЦІЯ КАРПАТСЬКОГО ЛІСОВОГО ЛАНДШАФТУ В УМОВАХ ЗМІНИ КЛІМАТУ ТА ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ: МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Лева частина площі Карпатського екорегіону припадає на лісгосподарські ландшафти, які, окрім постачання деревини та інших продуктів, надають клімато- та водорегулювальні екосистемні



послуги. Однак їхні корисні функції суттєво знижені через незбалансований менеджмент та зміну клімату. Тому гостро стоїть питання визначення екологічно обґрунтованих способів та обсягів лісозаготівлі та лісовідновлення в умовах прогресуючої зміни клімату. Отже, ця стаття описує концептуальні підходи та основні методичні прийоми дослідження майбутньої еволюції лісового ландшафту за різними сценаріями для вироблення оптимальної стратегії його менеджменту. Ми реалізуємо дослідження за допомогою спеціального програмного забезпечення – симулятора *LANDIS-II* – на прикладі Рахівського району Закарпаття (загальна площа лісів 1340 км²).

Лісовий ландшафт ми інтерпретували як процесну динамічну гетерогенну геоекосистему – поєднання екотопів (елементарних географічних екосистем) з деревною рослинністю. Контрольованим компонентом (виводом) екотопу є біотоп як поєднання властивостей лісоутворюючих видів, а контролюючим (вводом) – фізіотоп як сукупність лісорослинних умов. Біотопи змінюються у просторі та часі під впливом сукцесії, міграції видів, зміни клімату, природних дистурбацій та менеджменту. Таку концептуальну модель ми реалізуємо за допомогою симулятора *LANDIS-II* для шести лісоутворюючих видів: бука, граба, дуба, смереки, явора та ялиці. Предметом дослідження є просторово-часова зміна надземної біомаси цих видів протягом наступних 200 років, яка фіксується з геопросторовою роздільністю в 30 м та часовим кроком у 10 років.

Ми вже симулювали природну еволюцію деревостанів ландшафту Рахівщини за п'ятьма сценаріями зміни клімату (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 і базовим) та режиму природних дистурбацій – вітровалів й інвазій жука короїда смереки. Тепер ми параметризуємо модель для трьох провідних сценаріїв лісового менеджменту: 1. Інерційного, який передбачає підтримку великих площ монокультури смереки. 2. Адаптивного поточного, спрямованого на реструктуризацію деревостанів для підвищення їхньої стійкості в поточних лісорослинних умовах. 3. Адаптивного перспективного, який для реструктуризації бере до уваги умови кінця ХХІ століття.

Ключові слова: лісова геоекосистема, екотоп, фізіотоп, біотоп, ландшафт, *LANDIS-II*, зміна клімату, лісовий менеджмент, Карпатський екорегіон.

Kruhlov I.S., Smaliychuk A.D., Chaskovskyy O.G., Bilanuk V.I., Prytula R.V., Smaliychuk H.V.
PROSPECTIVE EVOLUTION OF THE CARPATHIAN FOREST LANDSCAPE UNDER CLIMATE AND LAND-USE CHANGE: METHODOLOGY OF THE RESEARCH

Managed forests occupy the great share of the Carpathian Ecoregion. They provide timber and other products as well as important climate- and water-regulating ecosystem services. However, their useful functions have been compromised by unsustainable management and climate change. Therefore, there is an urgent issue of defining ecologically sound methods and volumes of forest harvesting and planting under progressing climate change. Hence, this paper describes the framework and the main methods for the study of the forest landscape prospective evolution under different scenarios aimed at the development of an optimal management strategy. The study is realized via a forest landscape simulator *LANDIS-II* as the case of Rakhiv administrative region in the Ukrainian Carpathian Mountains (total forested area of 1,340 km²).

A forest landscape is interpreted as a process dynamic heterogeneous geoecosystem, which consists of ecotopes (elementary geographic ecosystems) with tree vegetation. A biotope, as a set of a tree stand properties, is a controlled component (output) of the ecotope, while a physiotope, as a set of abiotic tree stand conditions, is a controlling component (input). Biotopes change in space and time driven by succession, species migration, climate change, natural disturbances, and management. Such a framework has been realized by the means of *LANDIS-II* simulator for the six main species: European beech, European hornbeam, Norway spruce, pedunculated and sessile oaks (as one ecological unit), silver fir, and sycamore maple. The study focuses on the spatiotemporal change of the above-ground live biomass during the future 200 years with geospatial resolution of 30 m and timestep of 10 years.

A natural (intrinsic) evolution of the Carpathian forest landscape has been simulated under five climate change scenarios (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0, RCP8.5 and baseline) and different regimes of natural disturbances – windthrows and spruce bark beetle invasions. Now, the three main scenarios of forest management are under parametrization: 1. Inertial (persistent) scenario aims at preservation of vast single-aged spruce plantations. 2. Current adaptive scenario, which provides for tree stand restructuring according to current conditions. 3. Foresighted adaptive scenario, which considers conditions of the end of the 21st century.

Key words: Carpathian Ecoregion, forest geoecosystem, forest landscape simulator *LANDIS-II*, climate change, forest management, ecotope, physiotope, biotope, landscape.

Постановка проблеми. Карпатський мегаекорегіон має площу 213 тис. км² (Круглов та ін., 2012) і простягається через сім держав. Лісові ландшафти займають ~50% площі мегаекорегіону (Kozak et al., 2008), а лісистість його українського сектору в 2007 році становила 67,9% (Круглов та ін., 2013). Заліснена площа зростає протягом останніх десятиліть, особливо в Румунії, Україні та Угорщині (Griffiths et al., 2014). Левова частка площі припадає на господарські ліси, які, окрім постачання деревини, грибів, ягід, лікарських рослин та дичини, надають важливі підтримувальні та регульовальні екосистемні послуги – зберігають біорізноманіття, пом'якшують клімат, запобігають ерозії ґрунту, регулюють гідрологічний режим (Keeton et al., 2013; Круглов, 2020). Однак корисні функції лісових ландшафтів суттєво знижені через незбалансований менеджмент, зокрема через неприродоошадну лісозаготівлю (Kuemmerle et al., 2009; Часковський, Гриник, 2020) та поширену в минулому практику створення монокультур смереки, уразливих до зміни клімату та природних дистурбацій (Kruhlov et al., 2018). Тому на порядку денному стоїть питання формування насаджень, стійких до прогресуючої зміни природних умов, які здатні забезпечувати господарські потреби в деревині та водночас ефективно регулювати клімат і стік. Крім того, важливо визначити екологічно обґрунтовані способи та обсяги лісозаготівлі та лісовідновлення для різних типів геоекосистем в умовах зміни клімату (Carpathian Convention, 2011; Krynytskiy et al., 2017; ВРУ, 2019).

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Натепер провели дослідження сучасної (1982–2018 рр.) ретроспективної динаміки лісового покриву Українських Карпат – головно на підставі хронологічних рядів середньороздільних космозображень *Landsat* (Kuemmerle et al., 2009; Круглов та ін., 2013; Часковський, Гриник, 2020). Ці дослідження засвідчили загалом неприродоошадний характер лісозаготівлі, обсяги якої зростали протягом останнього десятиліття. Також за допомогою симулятора лісового ландшафту *LANDIS-II* змодельовані особливості перспективної природної динаміки Карпатського лісового ландшафту за основними сценаріями зміни клімату протягом наступних століть. Модель передбачає значні

зміни співвідношень між лісоутворюючими видами та суттєве зниження депонованих запасів карбону (Kruhlov et al., 2018). Однак нез'ясованими залишаються питання оптимальних підходів до лісозаготівлі та лісовідновлення в умовах різних амплітуд зміни клімату та, відповідно, траєкторій природної еволюції лісового ландшафту Карпат.

Постановка завдання. Отже, ця публікація має на меті розкриття основних концептуальних підходів та методичних прийомів дослідження майбутньої еволюції лісового ландшафту для вироблення оптимальної стратегії його менеджменту на прикладі репрезентативної території у Карпатах.

Територією дослідження є Рахівський район Закарпаття, межі якого збігаються з басейном верхньої течії р. Тиса. Він розташований посередині Карпатського екорегіону, у ньому представлені всі основні типи карпатських лісових екосистем (рис. 1). Площа становить 1892 км², а альтитуди змінюються від 265 м до 2061 м. Переважають середньогір'я (до ~2000 м) та низькогір'я (до ~1000 м), але на заході є й горбогір'я (до ~500 м). Територія складена головно кислим флішем, а на півдні – метаморфічними і вулканічними породами, які сформували розчленований рельєф. Реголіт всюди добре розвинений. Клімат помірний, перехідний до континентального з переважанням західних вітрів. Середньорічна температура повітря ХХ століття становила від 8,8°C у найнижчих долинах до 2,7°C на найвищих вершинах, а річна сума опадів – від 1000 до 1500 мм. Більшість опадів випадає протягом вегетаційного періоду. Ґрунтовий покрив представлений гірськими буроземами (Kruhlov et al., 2018).

Природна рослинність має виразну альтитудну диференційованість, її формують листяні та хвойні ліси, а також субальпійські й альпійські угруповання (див. рис. 1). Переважаючим видом є бук (*Fagus sylvatica*), який змішується зі скельним і черешчатим дубами (*Quercus petrae*, *Q. robur*) на менших альтитудах і зі смерекою (*Picea abies*) й ялицею (*Abies alba*) – на більших. На найвищих рівнях домінує смерека. Граб (*Carpinus betulus*) та явір (*Acer pseudoplatanus*) також доволі поширені. Природні ліси значно змінені та зменшені внаслідок господарської діяльності, хоча ~20% площі належить Карпат-

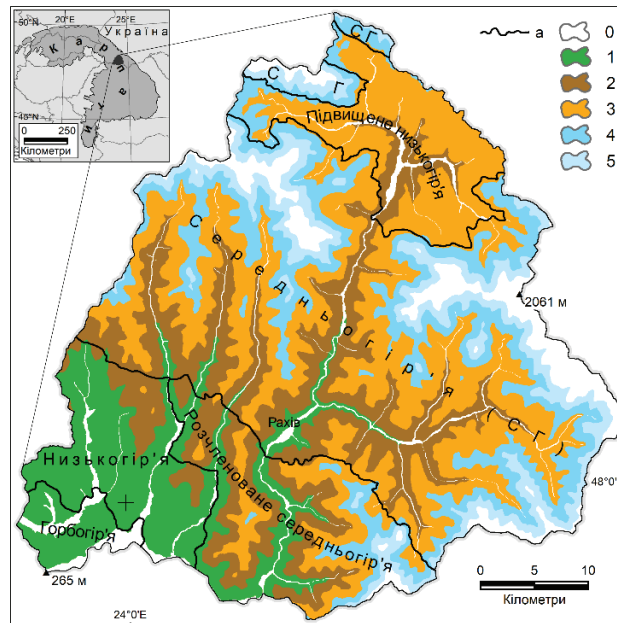


Рис. 1. Розташування та геоекологічні особливості території дослідження (Kruhlov et al., 2018; Круглов, 2008, 2020)

а – межі мезоекорегіонів. 0 – днища долин та субальпійсько-альпійська зона. Альтитудні зони природних лісів: 1 – дубових і букових (<750 м); 2 – букових (500–1000 м); 3 – смереково-букових (800–1300 м); 4 – буково-смерекових (1100–1450 м); 5 – смерекових (1300–1600 м).

ському біосферному резервату. Дослідження зосереджене на фактичному лісовому покриві, за виключенням дниць долин та субальпійської зони з фрагментарною деревною рослинністю. Отже, досліджувана загальна заліснена площа (ЗЗП) становить 1340 км². Ліси з переважанням смереки становлять 68% ЗЗП, з переважанням бука – 26% ЗЗП, а решта припадає на дубові, грабові, ялицеві та яворові формації (Kruhlov et al., 2018).

Концептуально-методичні передумови дослідження. Об'єктом дослідження є лісовий ландшафт як динамічна гетерогенна геоекосистема, залежними компонентами (виводами) якої є властивості деревостанів-біотопів. Предметом є перспективна просторово-часова зміна надземної живої біомаси (НЖБ) когорт деревостанів протягом майбутніх 200 років (починаючи від 2010 року та з часовим кроком 10 років) за різними сценаріями лісового менеджменту, зміни клімату та режиму природних дистурбацій. Дослідження зосередили на шести провідних лісоутворюючих (модельних) видах: буку, грабу, дубу (черешчатому та скельному як одній екологічній одиниці), смереці, явору та ялиці. Конкретні методичні підходи орієнтовані на технологію симулятора

LANDIS-II, а принципова організація моделі відображена на рис. 2.

З позицій геоекології лісовий ландшафт ми інтерпретуємо як динамічну гетерогенну геоекосистему – поєднання різних екоотопів (елементарних екосистем географічної розмірності) з деревною рослинністю. Контрольованою групою компонентів екотопу є біотоп (елементарний біоценоз географічної розмірності), який у лісовому ландшафті представлений головню властивостями деревостану – видовим та віковим складом, біомасою/продуктивністю тощо. Біотоп контролюється фізіотопом (лісорослинними умовами) як поєднанням мезокліматичних і ґрунтово-гідрологічних умов, які головню залежні від положення у мезорельєфі. Екотопи мають відмінні еволюційні траєкторії, зумовлені процесами саморозвитку біотопу (сукцесією), взаємодією із сусідніми екотопами через міграцію видів тощо, а також поступовою зміною макроклімату та природними (напр., вітровали) й антропогенними (напр., лісозагтвіля) дистурбаціями. Ці процеси призводять до еволюції як екологічної, так і геопросторової структур ландшафту (Круглов, 2020).

Такий концептуальний підхід ми реалізуємо за допомогою симулятора лісового ландшафту

LANDIS-II (www.landis-ii.org), який дає змогу моделювати перспективну еволюцію на рівні когорт – популяцій деревних видів одного віку в межах фізіотопів. Симулятор стохастично відображає: 1) сукцесійні процеси (конкуренцію між когортами за світло та життєвий простір, вкорінення когорт, їхнє статеве дозрівання та дисперсію насіння, а також старіння та відмирання); 2) поступову зміну клімату, яка виражається у модифікації ймовірності вкорінення когорт та їхньої продуктивності; 3) різноманітні природні дистурбації (вітрові, пірогенні, біогенні); 4) лісогосподарський менеджмент – різні типи рубки та садіння дерев. Табличними вводами симулятора є: кількісні життєві характеристики деревних видів (довговічність, вік статевої зрілості, радіус дисперсії насіння та тіневитривалість); ймовірність вкорінення та продуктивність видів у різних класах фізіотопів, зокрема в умовах поступової зміни клімату; уразливість до природних дистурбацій за класами фізіотопів; способи та обсяги рубок, а також насаджувані види, за лісогосподарськими виділами та зонами менеджменту. Геопросторовими вводами слугують растрові геодані щодо фізіотопів і початкових біотопів як поєднань когорт станом на початок симуляційного періоду. Для відображення менеджменту використовуємо геодані щодо лісогосподарських виділів та зон. Виводи є у формі хронологічних серій характеристик майбутніх деревостанів-когорт (видового та вікового складу, зокрема за біомасою) у вигляді геопросторових і табличних числових даних. Модель можна параметризувати для різних сценаріїв зміни клімату, природних дистурбацій та лісо-

господарського менеджменту (Gustafson et al., 2000; Scheller et al., 2007; Scheller, Mladenoff, 2004; Круглов, 2020).

Для реалізації такої моделі ядро симулятора LANDIS-II (Scheller et al., 2007) необхідно доповнити низкою додаткових модулів. Розширення *Biomass Succession* дає змогу моделювати зміну НЖБ когорт (Scheller, Mladenoff, 2004), а розширення *Base Wind* (Mladenoff, He, 1999) та *Base Biotic Disturbance Agent* (Sturtevant et al., 2004) – найпоширеніші типи природних дистурбацій – вітровали та інвазії шкідників, зокрема жука короїда смереки (*Ips typographus*). Лісовий менеджмент симулює розширення *Biomass Harvest*, яке відображає різні типи рубок з відмінними ротаційними періодами, а також садіння певних видів дерев (Gustafson et al., 2000).

Реалізована параметризація симулятора. Життєві характеристики модельних видів дерев визначили за літературними джерелами, а геодані зі 120 класами фізіотопів створили шляхом геоморфометричної та топобіокліматичної класифікації глобальної цифрової моделі висот *SRTM*. Для кожного класу екотопів продуктивність модельних видів розраховували за лісотаксаційними даними, а ймовірності вкорінення – за інформацією щодо потенційної природної рослинності (ППР). Початкові біотопи (понад 22 тисячі індивідуальних ареалів) генерували на підставі офіційної лісівничої повидільної бази даних. Роздільність растрових геоданих – 30*30 м. У дослідженні використали п'ять сценаріїв зміни клімату – базовий клімат кінця ХХ століття та чотири репрезентативні траєкторії зміни клі-

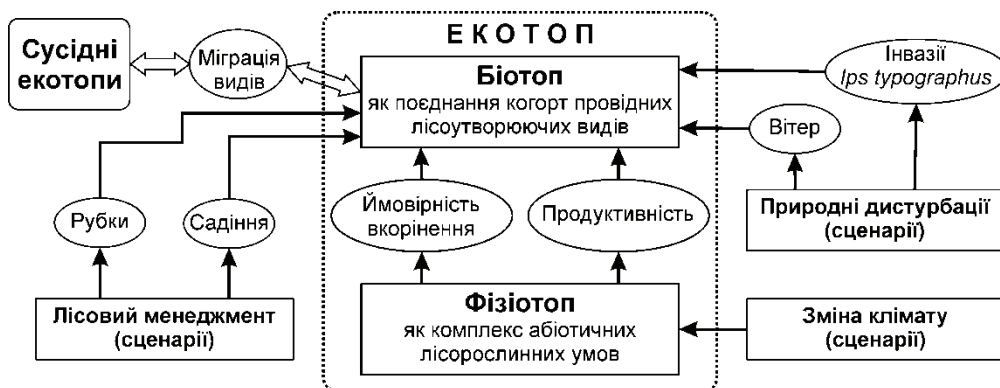


Рис. 2. Концептуальна схема динамічної організації лісового екотопу та його чинників, реалізована симулятором LANDIS-II



мату протягом XXI століття (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 та RCP8.5) у регіоні. Природні дестабілізації параметризували на підставі лісотаксаційних даних і літератури для умов базового клімату, а також для чотирьох сценаріїв його зміни, які передбачають інтенсифікацію збурень. Довготривала (500 років) симуляція можливих перспективних спонтанних еволюційних траєкторій карпатського ландшафту за чотирма сценаріями зміни клімату та режимів природних дестабілізацій засвідчила драматичне скорочення ареалу формації смерекових лісів (у 2,8–39,8 раза) та НЖБ смереки (у 1,7–9,3 раза) на фоні зростання ареалів та НЖБ інших п'яти модельних видів. Детальніше методику та результати цього етапу моделювання описали в окремих публікаціях (Kruhlov et al., 2018; Круглов, 2020).

Параметризація лісового менеджменту.

Ця частина дослідження перебуває у процесі реалізації. Якщо весь період моделювання охоплює 200 майбутніх років, то активний лісовий менеджмент буде симульований лише протягом перших 100 років. Протягом наступних 100 років модель буде відображати лише спонтанну еволюцію геоєкосистеми, і це дасть змогу краще зрозуміти довготривалі наслідки впливу лісового господарства на подальшу природну траєкторію розвитку ландшафту. Для параметризації розширення *Biomass Harvest*, яке стохастично симулює лісовий менеджмент, використовуємо геодані чинних лісгосподарських виділів, які розподілили поміж 11 лісгосподарськими зонами. Лісгосподарські зони виділили на підставі природних альтитудних зон та мезоєкорегіонів (див. рис. 1). Такий підхід дає змогу брати до уваги як топовіокліматичні особливості території, так і її геоморфологічну специфіку, яка визначає едафічні чинники та ризики розвитку ерозії. Ядерні та буферні зони Карпатського біосферного резервату, у яких заборонена господарська діяльність, віднесли до окремого класу. Так само, як і зміна клімату та природні дестабілізації, майбутній лісовий менеджмент буде симульований за кількома сценаріями.

Тепер обговорюють питання нових підходів до менеджменту лісів в умовах зміни клімату. Існує консенсус щодо того, що майбутні лісорослинні умови будуть відрізнятися від теперішніх, однак конкретні обсяги та особливості

змін залишаються нез'ясованими. Тому найкращою стратегією видається поєднання різних підходів, які спрямовані як на збереження цінних лісових ресурсів, так і на адаптацію до нових умов природного довкілля та мітигацію зміни клімату. У цьому контексті розглядають три основні підходи до лісового менеджменту: 1) інерційний (реактивний), націлений на збереження теперішніх деревостанів; 2) адаптивний поточний, який передбачає посилення стійкості лісових екосистем до змін, що вже спостерігаються; 3) адаптивний перспективний, який бере до уваги ймовірні майбутні зміни лісорослинних умов (Millar et al., 2007; Yousefpour et al., 2017).

Такі основні підходи лягають в основу трьох сценаріїв лісового менеджменту нашої моделі. 1. Інерційний сценарій передбачає подальшу підтримку великих площ насаджень монокультури смереки. Як і раніше, лісозаготівля ведеться суцільними рубками, але вік заготівлі смереки знижений до 50 років для уникнення великих втрат від вітрових дестабілізацій та інвазій короїда, які інтенсифікуються через зміну клімату та вражають головно старі та середньовікові смерекові ліси. 2. Адаптивний поточний сценарій полягає у цілеспрямованій реструктуризації деревостанів у такий спосіб, щоб їхній видовий склад відповідав ППР ХХ століття. Для цього, наприклад, здійснюють вибіркові рубки в монокультурах смереки та підсаджують інші види, передусім бук та ялицю, для формування мішаних, стійкіших до зміни клімату та природних дестабілізацій деревостанів. Вік заготівлі є оптимальним і становить близько 100 років. 3. Адаптивний перспективний сценарій подібний до адаптивного поточного, але має одну суттєву відмінність – переформування видового складу деревостанів орієнтоване не на теперішню ППР, а на ППР умов кінця ХХІ століття – час, коли деревостани будуть досягати віку зрілості.

Для реалістичної параметризації майбутнього лісового менеджменту важливо знати теперішні обсяги рубок у різних лісгосподарських зонах. Для отримання такої інформації ми використали дані геотеледetekції – опрацювали вісім різночасових спектрональних космозображень Sentinel-2 (<https://earthexplorer.usgs.gov>) з геометричним розділенням 10*10 м за 2015–2020 роки.

Для цього використали автоматизовану класифікацію методом опорних векторів (Support Vector Machines, програмне забезпечення imageSVM, www.hu-geomatics.de), яка дала змогу з вірогідністю понад 92% (каппа > 0.81) відобразити класи наземного покриття «ліс» та «неліс». Класифіковані різночасові геодані поєднали та з'ясували просторово-часові зміни у лісовому покритті за п'ятирічний період. Ми зафіксували знеліснення на 3 256 га, що становить 2,4% ЗЗП. Фактично всі порушення відбулися у господарських лісах (поза межами Карпатського біосферного резервату), і більшість з них (2 588 га) мала місце у деревостанах з переважанням смереки. Ця інформація дає змогу надійно визначити теперішні обсяги рубок, ротаційний період яких становить 208 років.

Висновки. Симулятор *LANDIS-II* є потужним інструментом передбачення перспективної динаміки деревостанів на ландшафтному рівні, зокрема в новітніх умовах, для яких відсутня емпірична інформація. Він дає змогу ефективно моделювати не лише сукцесію, але й зміну лісорослинних умов, природні збурення та лісовий менеджмент за різними, не пов'язаними одне з одним, сценаріями. Таке програмне забезпечення цілком адекватно реалізує наявні концептуальні підходи до еволюції лісового ландшафту, отже, його доцільно використовувати як провідний метод дослідження різноманітних альтернатив майбутнього лісових геоекологічних комплексів.

Попри ймовірніший характер досліджень майбутнього, важливим питанням залишається реалістичність просторово-часових проєкцій, оскільки вони є основою для адаптивного перспективного лісового менеджменту. І тут на передній план виступає проблема наявності достовірної інформації про життєві та екологічні характеристики видів дерев – наприклад, про їхню продуктивність у різних класах фізіотопів. Здобути таку інформацію можна лише через спеціальні багаторічні стаціонарні спостереження за добре обґрунтованими методиками з використанням специфічного інструментарію. На жаль, ми не зустрічали сучасних публікацій результатів таких досліджень в Українських Карпатах. Тому для параметризації доводиться використовувати міжнародну літературу та не дуже точні лісотаксаційні матеріали, що знижує достовірність

результатів дослідження. Отже, на порядку денному гостро постає питання започаткування регіональних стаціонарних геоекологічних спостережень, орієнтованих на збір даних для параметризації конкретних динамічних моделей – лісових, гідрологічних, геоморфологічних тощо.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Carpathian Convention. (2011). Protocol on sustainable forest management to the Framework Convention on the Protection and Sustainable Development of the Carpathians. URL: http://www.carpathianconvention.org/tl_files/carpathiancon/Downloads/01%20The%20Convention/1.1.2.2%20ProtocolonSustainableForestManagementsigned27may2011.pdf (дата звернення: 09.08.2021).
2. Griffiths, P., Kuemmerle, T., Baumann, M., Radeloff, V. C., Abrudan, I.V., Lieskovsky, J., Munteanu, C., Ostapowicz, K., & Hostert, P. (2014). Forest disturbances, forest recovery, and changes in forest types across the Carpathian ecoregion from 1985 to 2010 based on Landsat image composites. *Remote Sensing of Environment*, 151, 72–88. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.04.022> (дата звернення: 18.08.2021).
3. Gustafson, E.J., Shifley, S.R., Mladenoff, D.J., Nimerfro, K.K., & He, H.S. (2000). Spatial simulation of forest succession and timber harvesting using LANDIS. *Canadian Journal of Forest Research*, 30(1), 32–43. URL: <https://doi.org/10.1139/x99-188> (дата звернення: 18.08.2021).
4. Keeton, W.S., Angelstam, P.K., Bihun, Y., Chernyavskyy, M., Crow, S.M., Deyneka, A., Elbakidze, M., Farley, J., Kovalyshyn, V., Kruhlov, I., Mahura, B., Myklush, S., Nunery, J.S., Soloviy, I., & Zahvoyska, L. (2013). Sustainable forest management alternatives for the Carpathian Mountains with a focus on Ukraine. / In J. Kozak, K. Ostapowicz, A. Bytnerowicz, & B. Wyzga (Eds.). *The Carpathians: Integrating Nature and Society Towards Sustainability*. Pp. 331–352. *Springer*. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-12725-0_24 (дата звернення: 14.08.2021).
5. Kozak, J., Estreguil, C., & Ostapowicz, K. (2008). European forest cover mapping with high resolution satellite data: The Carpathians case study. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 10(1), 44–55. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2007.04.003> (дата звернення: 14.08.2021).
6. Kruhlov, I., Thom, D., Chaskovskyy, O., Keeton, W.S., & Scheller, R.M. (2018). Future forest landscapes of the Carpathians: Vegetation and carbon dynamics under climate change. *Regional Environmental Change*, 18(5), 1555–1567. URL: <https://doi.org/10.1007/s10113-018-1296-8> (дата звернення: 14.08.2021).
7. Krynytskyi, H.T., Chernyavskyy, M.V., Krynytska, O.H., Dejneka, A.M., Kolisnyk, B.I., &



Tselen, Y.P. (2017). Close-to-nature forestry as the basis for sustainable forest management in Ukraine. *Науковий вісник НЛТУ України*, 27(8), 26–31. URL: <https://doi.org/10.15421/40270803> (дата звернення: 19.08.2021).

8. Kuemmerle, T., Chaskovskyy, O., Knorn, J., Radeloff, V.C., Kruhlov, I., Keeton, W.S., & Hostert, P. (2009). Forest cover change and illegal logging in the Ukrainian Carpathians in the transition period from 1988 to 2007. *Remote Sensing of Environment*, 113(6), 1194–1207. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.02.006> (дата звернення: 19.08.2021).

9. Millar, C.I., Stephenson, N.L., & Stephens, S.L. (2007). Climate change and forests of the future: Managing in the face of uncertainty. *Ecological Applications*, 17(8), 2145–2151. URL: <https://doi.org/10.1890/06-1715.1> (дата звернення: 19.08.2021).

10. Mladenoff, D.J., & He, H.S. (1999). Design, behavior and applications of LANDIS, an object-oriented model of forest landscape disturbance and succession. / In D.J. Mladenoff & W.L. Baker (Eds.). *Spatial modeling of forest landscape change: Approaches and applications*. Pp. 125–162. Cambridge University Press.

11. Scheller, R.M., Domingo, J.B., Sturtevant, B.R., Williams, J.S., Rudy, A., Gustafson, E.J., & Mladenoff, D.J. (2007). Design, development, and application of LANDIS-II, a spatial landscape simulation model with flexible temporal and spatial resolution. *Ecological Modelling*, 201(3–4), 409–419. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.10.009> (дата звернення: 07.08.2021).

12. Scheller, R.M., & Mladenoff, D.J. (2004). A forest growth and biomass module for a landscape simulation model, LANDIS: Design, validation, and application. *Ecological Modelling*, 180(1), 211–229. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.01.022> (дата звернення: 07.08.2021).

13. Sturtevant, B.R., Gustafson, E.J., Li, W., & He, H.S. (2004). Modeling biological disturbances in LANDIS: A module description and demonstration using spruce budworm. *Ecological Modelling*, 180(1), 153–174. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.01.021> (дата звернення: 07.08.2021).

14. Yousefpour, R., Temperli, C., Jacobsen, J.B., Thorsen, B.J., Meilby, H., Lexer, M., Lindner, M., Bugmann, H., Borges, J., Palma, J., Ray, D., Zimmermann, N., Delzon, S., Kremer, A., Kramer, K., Reyer, C., Lasch-Born, P., Garcia-Gonzalo, J., & Hanewinkel, M. (2017). A framework for modeling

adaptive forest management and decision making under climate change. *Ecology and Society*, 22(4). URL: <https://doi.org/10.5751/ES-09614-220440> (дата звернення: 27.08.2021).

15. ВРУ, Верховна Рада України. (2019). Закон України «Про основні засади (стратегію) державної екологічної політики України на період до 2030 року» від 28.02.2019 № 2697-VIII. *Відомості Верховної Ради України*, 16. [VRU, Verkhovna Rada of Ukraine. (2019). Zakon Ukrainy “Pro osnovni zasady (strategiu) derzhavnoyi ekologichnoyi polityky Ukrainy na period do 2030 roku” vid 28.02.2019 No. 2697-VIII. *Vidomosti Verkhovnoyi Rady Ukrainy*, 16 (in Ukrainian)].

16. Круглов, І. (2008). Делімітація, метризація та класифікація морфогенних екорегіонів Українських Карпат. *Укр. Геогр. Журн.*, 3, 59–68. [Kruhlov, I. (2008). Delimitatsiya, metryzatsiya ta klasyfikatsiya morfogennykh ecoregioniv Ukrainykykh Karpat. *Ukr. Geogr. Zhurn.*, 3, 59–68 (in Ukrainian)].

17. Круглов, І. (2020). Трансдисциплінарна геоecologia : монографія. ЛНУ ім. І. Франка. [Kruhlov, I. (2020). *Transdystyplinarna geoeкологиya: monografiya*. LNU im. I. Franka (in Ukrainian)].

18. Круглов, І., Кюммерле, Т., Часковський, О., Кнорн, Я., Раделофф, Ф., & Гостерт, П. (2013). Динаміка лісистості Українських Карпат протягом 1988–2007 років: Геоecологічний аналіз засобами геоматики. *Вісник Львів. ун-ту. Серія геогр.*, 46, 218–233. [Kruhlov, I., Kuemmerle, T., Chaskovskyy, O., Knorn, J., Radeloff, V., & Hostert, P. (2013). *Dynamika lisyystosty Ukrainykykh Karpat protiahom 1988–2007 rokiv: Geoeologiichnyi analiz zasobamy geomatyky. Visnyk Lviv. un-tu. Seriya geogr.*, 46, 218–233 (in Ukrainian)].

19. Часковський, О.Г., & Гриник, Г.Г. (2020). Оцінювання втрат лісового покриву Українських Карпат дистанційними методами за матеріалами відкритих джерел супутникової інформації. *Науковий вісник НЛТУ України*, 30(1), 66–73. URL: <https://doi.org/10.36930/40300111>. [Chaskovskyy, O.H., & Hrynyk, H.H. (2020). Otsinuvannia vtrat lisovoho pokryvu Ukrainykykh Karpat dystantsiynymy metodamy za materialamy vidkrytykh dzherel suputnykovoyi informatsiyi. *Naukovyy visnyk NLTU Ukrainy*, 30(1), 66–73 (in Ukrainian)] (дата звернення: 27.08.2021).

Стаття надійшла до редакції 03.09.2021.

The article was received 03 September 2021.