



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

<http://fasu.nltu.edu.ua>
<https://doi.org/10.36930/412535>
Article received 2025.06.02
Article revised 2025.11.17
Article accepted 2025.11.20
Article published 2026.03.16

ISSN 1991-606X print
ISSN 2616-5015 online
@ ✉ Correspondence author
Oksana Pelyukh
pelyukh.o@nltu.edu.ua
103 General Chuprynka St.,
Lviv, 79057, Ukraine

This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 (CC BY 4.0) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



УДК 630*6:330.15:502.131.1(477.87/.88)

**Багатокритеріальна оптимізація сценаріїв менеджменту лісів Українських
Карпат у дискурсі парадигми екосистемних послуг**

О.Р. Пелюх¹, Л.Д. Загвойська²

В умовах посилення суспільного запиту на багатofункціональну роль лісів і послуги лісових екосистем, традиційні підходи до менеджменту лісового господарства виявилися неадекватними, особливо в Українських Карпатах, де поширення монокультурних похідних ялинових насаджень, сформованих для максимізації обсягів деревини, призвело до втрати їхньої стійкості. Ця проблема особливо гостра в Українських Карпатах, де поширення монокультурних похідних ялинових насаджень, які були сформовані для максимізації обсягів деревини, призвело до втрати їхньої стійкості, продуктивності та біорізноманіття. Ці одновікові насадження є менш стійкими до негативних чинників, таких як шкідники, хвороби та вітровали, порівняно з природними мішаними або буковими лісами. Усталені підходи до ведення лісового господарства потребують адаптації до нових умов для збалансування конфліктуючих потреб різних стейкхолдерів. Метою роботи є розроблення ефективних сценаріїв переформування цих насаджень і визначення оптимальних, враховуючи суперечливі потреби стейкхолдерів. За результатами моделювання, виконаного з використанням симулятора росту SIBYLA та застосуванням методу аналізу ієрархій, запропоновано 56 можливих сценаріїв та оцінено їх за лісogосподарським, екологічним, економічним і соціальним критеріями. Виявлено, що оптимальним сценарієм є той, який забезпечує формування цільового, наближеного до корінного, різновікового мішаного насадження шляхом природного понов-

¹ Пелюх Оксана Романівна – кандидат економічних наук, старший викладач кафедри економіки, туризму та рекреації. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: pelyukh.o@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1889-3623>

² Загвойська Людмила Дмитрівна – член-кореспондент Лісівничої академії наук України, професор, кандидат економічних наук, професор кафедри економіки, туризму та рекреації. Національний лісотехнічний університет України, вул. Генерала Чупринки, 103, м. Львів, 79057, Україна. E-mail: lyudmyla.zahvoyska@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0028-4723>

лення. Отримані кількісні оцінки приросту обсягів послуг лісових екосистем (регулювання, підтримання, туристично-рекреаційні можливості) можуть слугувати надійною інформаційною основою для визначення їхньої вартості та оцінювання еколого-економічної ефективності заходів переформування.

Ключові слова: метод імітаційного моделювання; метод аналізу ієрархій; критерії; оптимізація; прийняття управлінських рішень; туристично-рекреаційний потенціал лісів.

Вступ (Introduction).

Упродовж століть ліси відігравали важливу роль у забезпеченні людини їжею, прихистком, паливом, деревиною та ін. Однак, на сучасному етапі коеволюції соціальних та екологічних систем багатофункціональна роль лісів стає дедалі більш затребуваною, пріоритезується суспільний запит на такі послуги лісових екосистем, як послуги регулювання і підтримання (Reid et al., 2005; Haines-Young, & Potschin, 2012). Тож звичні підходи, моделі і сценарії ведення лісового господарства стають неадекватними, оскільки вони не враховують складний і динамічний нексус екологічних, економічних і соціальних послуг, який охоплює їжу, воду, паливо, сировину, дослідницькі, рекреаційні, лікувальні, сакральні і туристичні можливості, а також пом'якшує зміни клімату, стихійні лиха тощо.

Ці тенденції особливо гостро відчуваються на сьогодні у лісах Українських Карпат, які є унікальним природним комплексом, котрий виконує критично важливі екологічні, соціальні та економічні функції. Однак, значні антропогенні впливи, яких зазнавали Українські Карпати впродовж останніх сторіч, були спрямовані на максимізацію заготівлі обсягів деревини і призвели до поширення похідних ялинових насаджень, які спочатку насправді були більш продуктивними. Проте з часом ці насадження, монокультурні та одновікові за своєю природою, виявилися менш стійкими до впливу негативних чинників – вітровалів, буреломів, пошкодження шкідниками, ураження патогенами тощо, втративши свою стійкість, продуктивність і біорізноманіття порівняно з природними буковими чи мішаними лісами (Дебринюк, 2011; Загвойська, Пелюх, 2016).

Тож стає очевидним, що усталені підходи до ведення лісового господарства потрібно адаптувати до нових умов (Криницький та ін., 2014). Необхідно збалансувати конфліктуючі, а часто навіть і взаємовиключні потреби стейкхолдерів, переосмислити існуючі стратегії, підходи, методи і моделі лісокористування. У цьому контексті багатокритеріальна оптимізація постає як потужний інструмент розроблення та оптимізації сценаріїв менеджменту, які дають можливість узгодити різні інтереси і пріоритети.

Значний внесок у розробку моделей процесів, які відбуваються в лісових екосистемах, зробили низка науковців (Ковальчук, 2003;

Fabrika, 2003; Fabrika, & Ďurský, 2005; Merganycova, Pietsch, & Hasenauer, 2005; Лакида, Домашовець, Швець, 2013; Fabrika, & Pretzsch, 2013; Букша та ін., 2017 та ін.), досліджуючи широкий спектр лісорослинних умов. Багато робіт присвячено також проблемам інтегрування моделей динаміки лісових екосистем у практику прийняття рішень на засадах сталого розвитку (Адамовський, 2005; Козак, & Парпан, 2009; Buongiorno, & Gilles, 2003; Bravo et al., 2024 та ін.).

Актуальність теми зумовлена невідповідністю традиційних підходів до менеджменту лісів в умовах глобальної полікризи і зростаючого суспільного запиту на їхню багатофункціональну роль та екосистемні послуги. Ця проблема є критичною для Українських Карпат, де історичне фокусування на максимізації обсягів деревини призвело до поширення вразливих монокультурних ялинових насаджень, які втрачають свою біологічну стійкість і продуктивність. Необхідність переосмислення стратегій лісокористування та збалансування конфліктуючих інтересів різних стейкхолдерів через багатокритеріальну оптимізацію сценаріїв переформування лісів є нагальною для забезпечення сталого розвитку регіону.

Метою дослідження є розроблення, аналізування та обґрунтування оптимального сценарію переформування похідного ялинового насадження в Українських Карпатах з урахуванням кількісного оцінювання вигід у дискурсі парадигми екосистемних послуг, що дасть змогу забезпечити збалансоване лісокористування в довгостроковій перспективі.

Об'єкти і методика дослідження (Objects and methods).

Об'єктом дослідження є ділянка колишнього Державного підприємства «Рахівське лісове дослідне господарство» (ДП «Рахівське ЛДГ») Закарпатської області, а саме ділянка площею 7,2 га, яка знаходиться на території Щаульського лісництва (кв. 6, вид. 1). Предмет досліджень – теоретико-методологічні та прикладні аспекти багатокритеріальної оптимізації сценаріїв менеджменту ділянки дослідження в Українських Карпатах у дискурсі парадигми екосистемних послуг.

Методами дослідження є детерміноване імітаційне моделювання динаміки лісостатнів з

використанням симулятора росту лісонасаджень SIBYLA (Fabrika, & Ďurský, 2005), яке використано для відтворення біодинаміки насаджень, зумовленої природними процесами та менеджментом, а також метод аналізу ієрархій (Saaty, 2008) – математичний апарат, який дозволяє визначати оптимальний варіант із набору можливих шляхом їх попарного порівняння за критеріями різної важливості. Результати використання цих методів дадуть змогу забезпечити збалансоване лісокористування у довгостроковій перспективі на засадах сталого розвитку.

Результати (Results).

Одним із ефективних інструментів моделювання складної поведінки лісових екосистем є симулятор росту SIBYLA (Simulator of Forest Biodynamic), який розроблений проф. Марекком Фабрікою для дослідження лісів Словаччини (Fabrika, & Ďurský, 2005). Симулятор надає можливість моделювати поведінку лісових екосистем у різних типах лісорослинних умов. Модель побудована на принципах, розроблених для програми SILVA 2.2 (Pretzsch, Biber, & Dursky, 2002), але має більше можливостей і дозволяє моделювати ріст одно- та різновікових чистих і мішаних лісових насаджень. Програма дає змогу моделювати ріст лісових насаджень, які знаходяться на території всієї Словаччини, а для лісових насаджень поза її межами потрібно проводити калібрування моделі.

Найменшою одиницею моделювання для цього симулятора росту є дерево або деревостан. Їх моделюють за допомогою рівнянь і співвідношень, що відображають причинно-наслідкові взаємозв'язки, описують реальні біологічні процеси у лісових екосистемах (Загвойська, Пелюх, 2015). Перевагами симулятора SIBYLA є коректне відтворення нелінійної динаміки лісових екосистем завдяки застосуванню складних моделей, які враховують лісорослинні умови росту лісів та інші важливі чинники (Fabrika, & Ďurský, 2005; Загвойська, Пелюх, 2016a, 2016b).

Зважаючи на переваги симулятора SIBYLA, ми застосували його для розроблення та аналізу сценаріїв переформування похідного ялинового насадження на території колишнього ДП «Рахівське ЛДГ» Закарпатської області. Ця ділянка була обрана на основі експертних суджень та аналізу даних Українського державного проектного лісовпорядного виробничого об'єднання ВО «Укрдержлісprojekt», які свідчать про те, що на території Закарпатської області, де знаходиться 52,55% усієї території Українських Карпат, сконцентрована найбільша площа засохлих похідних ялинових насаджень.

Відповідно до лісоінвентаризаційних матеріалів ДП «Рахівське ЛДГ», ділянка дослідження

знаходиться на території Щаульського л-ва (кв. 6, вид. 1, пл. 7,2 га), розташована на схилі західної експозиції стрімкістю 21° на висоті 650 м н.р.м. і відноситься до категорії рекреаційно-оздоровчих і берегозахисних лісів.

На час збору інформації на ділянці росло 62-річне насадження складу 9Ял1Кля. Під наметом ялиниці сформувався підріст за участю ялиці та бука із середнім віком 10 років. Метою переформування насадження на дослідній ділянці було створення цільового деревостану на основі природного поновлення, який би характеризувався різновіковістю, мішаним видовим складом і відповідав типу лісу. Дослідну ділянку віднесено до вологої буково-ялицевої сусмеричини (С₃-бк-яцСм), тобто до умов, сприятливих для успішного росту деревостану за участю 60-70% ялини, 20-30% бука, 10-20% ялиці з домішкою явора та ясеня.

Повнота насадження модельованої ділянки становила 0,7 із загальним запасом 302 м³·га⁻¹, середньою висотою дерев 26 м та середнім діаметром 28 см. Густота насадження становила 740 шт./га з площею поперечного перерізу 29,7 м²/га. Розподіл стовбурів відповідав нормальному закону розподілу та свідчив про наявність широкого діапазону діаметрів дерев (16–32 см). Бонітет деревостану – І^a. На досліджуваній ділянці лісу спостережено інтенсивне всихання ялини (15% від загальної площі). Зібрані авторами лісоінвентаризаційні матеріали про досліджувану ділянку слугували вихідними даними для імітаційного моделювання.

Моделювання сценаріїв переформування похідного ялинового насадження симулятором SIBYLA виконано відповідно до законодавчо-правової бази України (Пелюх, 2018) і рекомендацій щодо реалізації цього лісгосподарського заходу, розроблених групою науковців УкрНДІ-гірліс ім. П.С. Пастернака (м. Івано-Франківськ) і Національного лісотехнічного університету України (м. Львів) (Парпан та ін., 2014). Зокрема, у модулі рубки запрограмовано застосування таких лісівничих втручань як проріджування та вибирання окремих дерев із цільовим діаметром.

Вітчизняні та зарубіжні науковці (Hanewinkel, & Pretzsch, 2000; Hanewinkel, 2001; Schütz, 2001; Шпарик, Леснік, 2006; Криницький та ін., 2014; Лавний, Шніцлер, 2014; Парпан та ін., 2014; Шпарик, 2016 та ін.) приділяли значну увагу розробленню принципів, підходів і сценаріїв переформування похідних ялинових насаджень. Вивчивши цей досвід, автори розробили і змодельовали 56 потенційних сценаріїв переформування (Pelyukh et al., 2016a, 2016b, 2018), які відрізнялися комбінаціями інтенсивності рубок та часу їх проведення. Проте, застосування лише чотирьох із них S_i ($i=1:4$) дало змогу досягнути

цільового видового складу, складної вертикальної структури, покращити санітарний та естетичний стан ділянки, підтримати стійкість і стабільність деревостану, підвищити його продук-

тивність, відтак – досягти мети переформування (табл. 1). Тривалість модельованих сценаріїв переформування становила 80 років і включала вісім періодів по 10 років.

Таблиця 1. Зведені результати імітаційного моделювання процесу переформування похідного ялинового насадження на прикладі ДП «Рахівське ЛДГ», отримані з використанням симулятора росту SIBYLA

Table 1. Consolidated results of simulation of the process of a secondary spruce stand conversion, obtained with the SIBYLA growth simulator: Rakhiv State Forestry Enterprise case study

Показник	Од. вим.	Початковий стан	Сценарії переформування $S_i (i=1:4)$			
			S1	S2	S3	S4
Видовий склад	%	90 ялина 10 бук, ялиця, явір	80 ялина 20 бук, ялиця, явір	80 ялина 20 бук, ялиця, явір	75 ялина 25 бук, ялиця, явір	73 ялина 27 бук, ялиця, явір
Запас деревини	м³/га	305	450	431	352	336
Частка деревини І-ІІВ класів	%	70,87	64,66	62,79	58,34	54,61
Різнорозмірність діаметру	0-1	0,29	0,64	0,62	0,60	0,60
Різнорозмірність висоти	0-1	0,18	0,46	0,43	0,42	0,42
Індекс загального біорізноманіття	0-10	4,909	7,621	7,630	7,736	7,769

Примітка. Складено авторами на основі результатів імітаційного моделювання симулятором SIBYLA. Жирним шрифтом виділено найкраще значення для кожного показника.

Сценарії переформування лісонасаджень відрізняються інтенсивністю і часом проведення рубок. Зокрема, вибирання окремих дерев ялини із цільовим діаметром 45 см застосовано для сценарію S_2 у п'ятому періоді переформування, для S_3 – у п'ятому і восьмому, для S_4 – у сьомому.

Для вибору оптимального сценарію переформування було застосовано один із методів багатокритеріального оцінювання – метод аналізу ієрархій (Saaty, 2008), який передбачає застосування математичного апарату, що дає можливість вибирати найкращий сценарій шляхом їх попарного порівняння за обраними критеріями з урахуванням їхньої важливості.

Для оптимізації вибору стратегії переформування похідного ялинового насадження на досліджуваній ділянці розроблено чотирирівневу ієрархічну модель (рис. 1). Першим рівнем ієрархічної моделі є формулювання мети оптимізації – вибір найкращого сценарію переформування похідних ялинових насаджень. Другий рівень – критерії переформування – лісгосподарський, екологічний, економічний і соціальний, для яких на основі результатів моделювання сценаріїв переформування складено перелік індикаторів (третій рівень). Четвертий рівень моделі – це пропонувані альтернативні сценарії переформування $S_i (i=1:4)$ (див. рис. 1).



Рис. 1. Чотирирівнева ієрархічна модель вибору оптимального сценарію переформування похідного ялинового насадження на території ДП «Рахівське ЛДГ»

Fig. 1. Four-level hierarchical model for choosing the optimal scenario for conversion of a derived spruce stand: the State Enterprise «Rakhivske Forestry»

Для кількісного попарного оцінювання важливості критеріїв і сценаріїв побудованої ієрархічної моделі використано засоби системи підтримки прийняття рішень (СППР) Expert Choice

(табл. 2). Таке порівняння дає змогу врахувати важливість критеріїв у досягненні поставленої мети, а також оцінити переваги кожного із запропонованих сценаріїв щодо кожного критерію.

Таблиця 2. Результати оцінювання переваг сценаріїв переформування
Table 2. Results of assessing the attractiveness of the conversion scenarios

Критерій (його важливість, %)	Сценарії переформування S_i ($i=1:4$), %				Індекс неузгодженості
	S_1	S_2	S_3	S_4	
Лісгосподарський критерій (27,7)	32,0	14,4	14,4	39,2	0,01
Екологічний критерій (16,0)	5,5	11,8	26,2	56,5	0,04
Економічний критерій (46,7)	34,0	28,1	23,9	14,0	0,02
Соціальний критерій (9,5%)	3,8	9,3	25,4	61,5	0,01
Пріоритетність сценаріїв переформування з урахуванням важливості всіх критеріїв	28,4	21,3	21,6	28,8	0,02

Примітка. Розраховано авторами з використанням СППР Expert Choice. Жирним шрифтом виділено найкраще значення показника для кожного критерію порівняння.

З метою встановлення важливості критеріїв проведено опитування експертів-практиків (працівники ДП «Рахівське ЛДГ» і ДП «Сколівське ЛГ»), а також експертів-науковців (працівники НЛТУ України). За їхніми оцінками, найважливішими критеріями для вибору оптимального сценарію переформування є економічний – 46,7% і лісгосподарський – 27,7%.

З погляду економічного критерію, оптимальним варіантом є застосування сценарію переформування S_1 (34,0%), а з погляду лісгосподарського – S_4 (39,2%). Якщо ж брати до уваги важливість усіх критеріїв, то оптимальним сценарієм переформування похідного ялинового насадження на

території ДП «Рахівське ЛДГ» є саме сценарій S_4 (рейтинг 28,8%). Дещо нижчий рейтинг має сценарій S_1 – 28,4%. Зауважимо, що рівень неузгодженості становить 0,02, тобто він є значно меншим від критичного значення, що підтверджує узгодженість оцінок експертів.

Результати моделювання (рис. 2) демонструють, що відповідно до визначених за оцінками експертів рівнів важливості критеріїв, оптимальним сценарієм переформування насадження на досліджуваній ділянці є сценарій S_4 . Саме він найкраще задовольняє всі обрані критерії (на 28,8% із 100% можливих) і загалом є найкращим порівняно з трьома іншими.

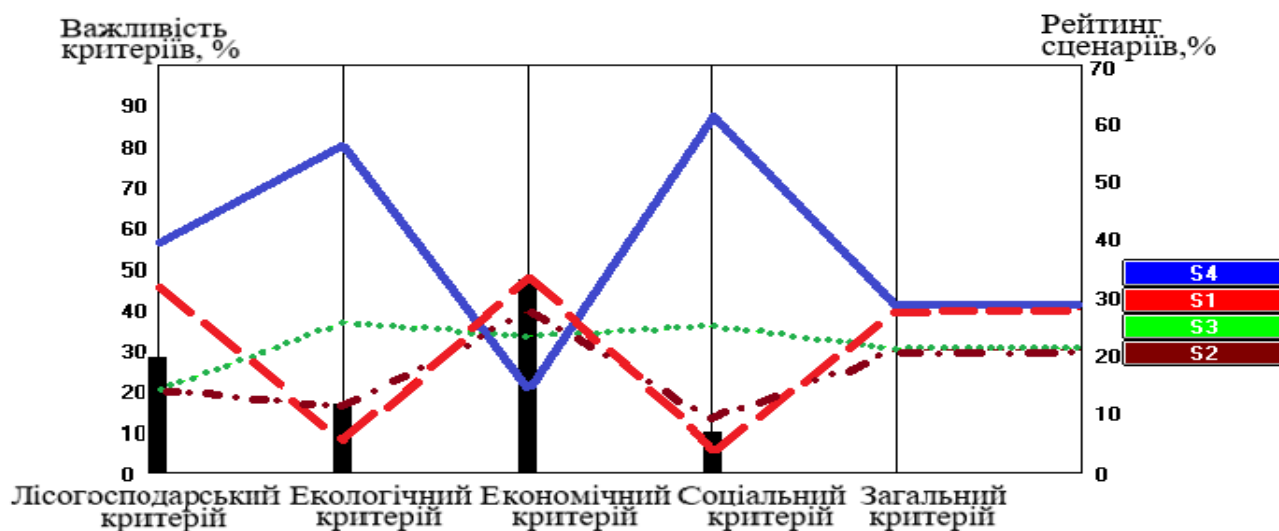


Рис. 2. Одно- і багатокритеріальне ранжування сценаріїв переформування S_i ($i=1:4$) з використанням СППР Expert Choice

Fig. 2. Single- and multicriteria ranking of conversion scenarios S_i ($i=1:4$) using Expert Choice DSS

Примітка. Розраховано авторами з використанням СППР Expert Choice

Сценарії переформування S_1 і S_4 задовольняють обрані критерії майже однаково (на 28,4% та 28,8% відповідно). Поряд з цим, сценарії

переформування S_2 і S_3 є найгіршим серед усіх інших, оскільки задовольняють виконання всіх критеріїв лише на 21,3% та 21,6% відповідно.

У випадку зростання важливості економічного критерію, переваги у застосуванні сценарію

переформування S_1 тільки зростатимуть, тоді як за сценарієм S_4 – знижуватимуться (рис. 3).

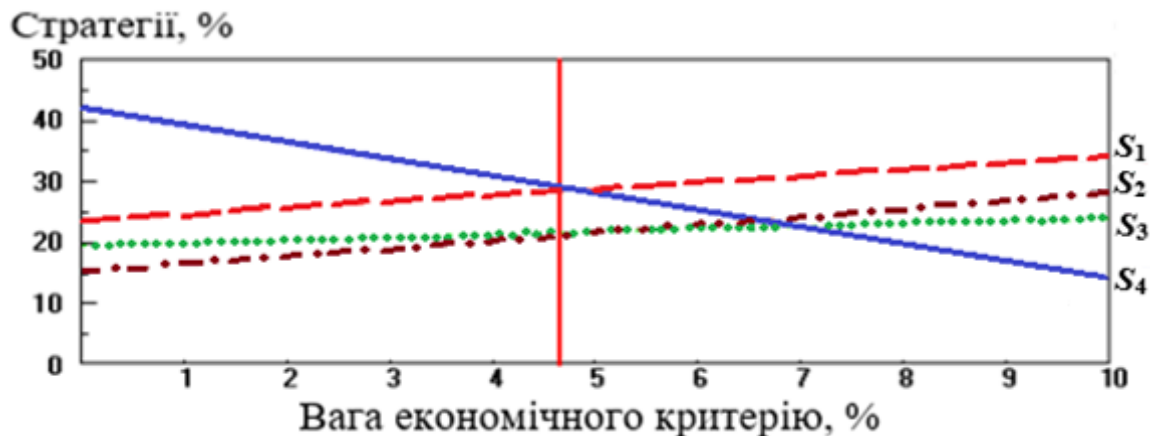


Рис. 3. Чутливість рейтингу сценаріїв до зміни ваги економічного критерію

Fig. 3. Sensitivity of the scenarios ranking to changes of the weight of the economic criterion

Примітка. Розраховано авторами з використанням СППР Expert Choice.

Проте, якщо найбільшого значення надати екологічному критерію, то найкращим сценарієм

стане саме S_4 (рис. 4), який за всіма критеріями знаходиться у протифазі до S_1 (рис. 2, 3 і 4).



Рис. 4. Ефективність сценаріїв переформування S_i ($i=1:4$) у досягненні екологічного та економічного критеріїв. Розраховано з використанням СППР Expert Choice.

Fig. 4. Effectiveness of conversion scenarios S_i ($i=1:4$) in achieving environmental and economic criteria. Calculated by authors using Expert Choice DSS

Примітка. Розраховано авторами з використанням СППР Expert Choice.

Найкращий сценарій переформування насаджень на досліджуваній ділянці мав би знаходитись у верхньому правому прямокутнику (див. рис. 4). Проте, лише сценарій переформування S_4 наближається до нього.

Дискусія (Discussion).

Вихідною передумовою цього дослідження була неадекватність традиційних підходів до менеджменту лісового господарства в умовах посилення суспільного запиту на багатофункціональну роль лісів і послуги лісових екосистем. Ця проблема є особливо гострою в Українських Карпатах, де монокультурні похідні ялинові насадження, сформовані здебільшого для отримання максимальних обсягів деревини, втратили свою стійкість, продуктивність і біорізноманіття. Метою роботи передбачено розробку сценаріїв

переформування таких насаджень і визначенні оптимального з них, враховуючи суперечливі потреби стейкхолдерів. Застосування методу імітаційного моделювання за допомогою симулятора росту SIBYLA, який коректно відтворює нелінійну поведінку лісових екосистем, враховуючи лісорослинні умови та інші чинники, у поєднанні з методом аналізу ієрархій забезпечило системне охоплення й кількісне оцінювання різнобічних впливів заходів переформування.

Результати застосування методу аналізу ієрархій чітко засвідчують, що оптимальним сценарієм переформування похідного ялинового насадження є сценарій S_4 , який отримав рейтинг 28,8%. Цей сценарій дозволяє якнайкраще досягти мети дослідження, а саме – сформувати цільове, наближене до корінного, різновікове мішане наса-

дження шляхом сприяння природному поновленню. Цей підхід є критично важливим, оскільки він сприяє підвищенню рівня біорізноманіття, забезпечує формування біотично стійкого, стабільного і продуктивного насадження, що особливо актуально в умовах зміни клімату. Проте аналіз чутливості та експертних оцінок виявив *значне неспівпадіння* між економічними та екологічними цілями.

Згідно з оцінками експертів-практиків і науковців, найбільшу вагу для вибору оптимального сценарію мали економічний і лісогосподарський критерії (46,7% і 27,7% відповідно). У той час як сценарій S_4 є оптимальним з погляду лісогосподарського критерію (39,2%), сценарій S_1 (з рейтингом 28,4%) виявився оптимальним для економічного критерію (34,0%). Сценарії S_1 та S_4 знаходяться практично у протифазі відповідно до економічного та екологічного критеріїв. Аналіз чутливості результатів до важливості критеріїв підтвердив, що у випадку зростання важливості економічного критерію переваги у застосуванні S_1 збільшуватимуться, тоді як S_4 – падатимуть. І навпаки, якщо найбільшого значення надати екологічному критерію, то найкращим сценарієм стане саме S_4 . Цей конфлікт демонструє необхідність багатокритеріальної оптимізації для збалансування суперечливих потреб різних стейкхолдерів.

Незважаючи на напрацьований методологічний внесок, дослідження має певні обмеження. Зокрема, тут не були враховані зміни кліматичних умов, виникнення негативних стихійних явищ у гірських регіонах, здійснення нелегальних рубок тощо впродовж періоду переформування. Тому, отримані результати багатокритеріальної оптимізації сценаріїв переформування ялинового насадження на досліджуваній ділянці необхідно інтерпретувати з обережністю. Крім того, їх не можна екстраполювати на інші лісові ділянки, які необхідно переформувувати, оскільки для розроблення сценаріїв переформування дуже важливі особливості лісорослинних умов, склад і вік насадження, наявність підросту деревних видів відповідно до типу лісу. Не були також враховані неоцінені ринком послуги екосистем, цінність яких складно отримати для послуг регулювання і підтримання, а також для культурних послуг, що може суттєво змінити пріоритети запропонованих сценаріїв.

Висновки (Conclusion).

1. Результати застосування методу аналізу ієрархій на основі кількісного оцінювання потоку екосистемних послуг змодельованого процесу переформування похідного ялинового насадження на території ДП «Рахівське ЛДГ» програмою SIBYLA демонструють, що сценарій переформування S_4 дозволяє якнайкраще досягти мети переформування деревостану, а саме, отримати цільовий, наближений до корінного видовий

склад зі складною вертикальною структурою шляхом сприяння природному поновленню.

2. Застосування сценарію переформування S_4 дасть змогу підвищити рівень біорізноманіття на ділянці дослідження, забезпечити біотичну стійкість, стабільність і продуктивність насадження навіть в умовах зміни клімату.

3. Отримані кількісні оцінки приросту обсягів послуг лісових екосистем унаслідок застосування сценарію переформування S_4 є основою надійного інформаційного забезпечення для визначення їхньої вартості та оцінювання еколого-економічної ефективності заходів переформування з погляду лісовласника і суспільства.

Конфлікт інтересів (Conflicts of Interest).

Автори заявляють про відсутність у них відомих конкуруючих фінансових інтересів чи особистих зв'язків, які могли б вплинути на результати, представлені у цій статті.

Список літератури (References)

- Adamovskyy, O. M. (2005). Modeling methods in forestry. *Scientific Bulletin of the National Forestry University of Ukraine*, 15(7), 67–71. <https://cyberleninka.ru/article/n/metodi-modelyuvannya-u-lisovomu-gospodarstvi.pdf> [Адамовський, О. М. (2005). Методи моделювання у лісовому господарстві. *Науковий вісник Національного лісотехнічного університету України*, 15(7), 67–71.] (in Ukrainian)
- Bravo, F., Yang, S. I., Ruano, I., Antón-Fernández, C., Herrero, C., & Durango, I. (2024). Artificial intelligence and forestry. *Frontiers in Forests and Global Change*, 7, 1500701. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1500701>
- Buksha, I. F., Shvydenko, A. Z., Bondaruk, M. A., Pyvovar, T. S., Buksha, M. I., Pasternak, V. P., ... Krakovska, S. V. (2017). Methodology for modeling and assessing climate change impacts on forest phytocoenoses. *Scientific Bulletin of National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Forestry & Ornamental Horticulture Series*, 266, 26–38. <https://forestscience.com.ua/uk/journals/266-2017/myetodologiya-modyelyuvannya-ta-otsynyuvannya-vplyvu-zmini-klimatu-na-lisovi-fitotsyenozi-ukrayini> [Букша, І. Ф., Швиденко, А. З., Бондарук, М. А., Пивовар, Т. С., Букша, М. І., Пастернак, В. П., ... Краковська, С. В. (2017). Методологія моделювання та оцінювання впливу зміни клімату на лісові фітоценози. *Науковий вісник НУБіП України. Серія: Лісівництво та декоративне садівництво*, 266, 26–38.] (in Ukrainian)
- Buongiorno, J., & Gilles, J. (2003). *Decision methods for forest resource management*. Academic Press.

- Debryniuk, Iu. M. (2011). Drying-out of spruce forests: Causes and consequences. *Scientific Bulletin of Ukrainian National Forestry University "Urbanization Processes in Mountain Landscapes and Ways of Their Regulation"*, 21(16), 32–38. https://nv.nltu.edu.ua/Archive/2011/21_16/index.htm [Дебринюк, Ю. М. (2011). Всихання смеркових лісів: причини та наслідки. *Науковий вісник НЛТУ України «Процеси урбанізації в гірських ландшафтах та шляхи їх регулювання»*, 21(16), 32–38.] (in Ukrainian)
- Fabrika, M. (2003). Virtual forest stands as a component of forestry education systems. *Journal of Forest Science*, 49(9), 419–428. <https://www.agriculturejournals.cz/pdfs/jfs/2003/09/04.pdf>
- Fabrika, M., & Ďurský, J. (2005). Algorithms of thinning models for SIBYLA simulator. *Journal of Forest Science*, 51(10), 431–445. <https://jfs.agriculturejournals.cz/pdfs/jfs/2005/10/01.pdf>
- Fabrika, M., & Pretzsch, H. (2013). *Forest ecosystem analysis and modeling*. TU Zvolen.
- Haines-Young, R., & Potschin, M. (2012). *CICES V4.1: Common international classification of ecosystem services* (pp. 1–17). European Environment Agency. https://cices.eu/content/uploads/sites/8/2012/09/CICES-V4_Final_26092012.pdf
- Hanewinkel, M. (2001). Economic aspects of converting spruce monocultures. *Forest Ecology and Management*, 151, 181–193. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00707-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00707-6)
- Hanewinkel, M., & Pretzsch, H. (2000). Modelling conversion from even- to uneven-aged spruce stands. *Forest Ecology and Management*, 134, 55–70. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00245-5](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00245-5)
- Kozak, I., & Parpan, V. (2009). *Ecological modeling using STELLA software*. Ivano-Frankivsk: Plai. [Козак, І., Парпан, В. (2009). *Екологічне моделювання із застосуванням програми STELLA*. Івано-Франківськ: Плай. 84 с.] (in Ukrainian)
- Kovalchuk, P. I. (2003). *Modelling and forecasting environmental conditions*. Kyiv: Lybid. [Ковальчук, П. І. (2003). *Моделювання і прогнозування стану навколишнього середовища*. Київ: Либідь.] (in Ukrainian)
- Krynytskyu, H. T., Cherniavskyy, M. V., Derbal, Y. Y., Delehan, I. V., Myklush, S. I., Parpan, V. I., ..., Jaloviar, P. (2014). Close-to-nature and multifunctional forest management in the Carpathian region of Ukraine and Slovakia. PE "Kolo". <https://www.forza.org.ua/uk/nablizhene-do-prirodi-ta-bagatofunkcionalne-vedennya-lisovogo-gospodarstva-v-karpatskomu-regioni> [Криницький, Г. Т., Чернявський, М. В., Дербаль, Ю. Ю., Делеган, І. В., Миклуш, С. І., Парпан, В. І., ... Яловіар, П. (2014). *Наближене до природи та багатofunkціональне ведення лісового господарства в Карпатському регіоні України та Словаччини*. Ужгород: ПП «Коло». 280 с.] (in Ukrainian)
- Lavnyu, V. V., & Shnitsler, H. (2014). Experience of conversion cuttings in secondary spruce stands in Germany. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 12, 73–78. <https://fasu.nltu.edu.ua/index.php/nplanu/article/view/138> [Лавний, В. В., Шніцлер, Г. (2014). Досвід проведення рубок переформування в Німеччині. *Наукові праці ЛАН України*, 12, 73–78.] (in Ukrainian)
- Lakyda, P. I., Domashovets, H. S., & Shvets, Yu. P. (2013). Simulation of regulatory information security assessment components phytomass stands Crimean pine and deposit their carbon. *Ukrainian Journal of Forest and Wood Science*, 187(3), 147–153. <https://forestscience.com.ua/uk/journals/187-chastina-3-2013/modyelyuvannya-normativno-informatsynogo-zabyezpyechyennya-otsinki-komponentiv-nadzemnoyi-fitomasi-dyeryevostaniv-sosni-krimskoyi-ta-dyeponovanogo-v-nikh-vuglyetsyu> [Лакида, П. І., Домашовець, Г. С., Швець, Ю. П. (2013). Моделювання надземної фітомаси сосни кримської. *Науковий вісник НУБіП України. Серія: Лісівництво та декоративне садівництво*, 187(3), 147–153.] (in Ukrainian)
- Merganycova, K., Pietsch, S. A., & Hasenauer, H. (2005). Testing mechanistic modelling for forest management. *Forest Ecology and Management*, 207, 37–57. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.017>
- Parpan, V. I., Shparyk, Yu. S., Slobodian, P. Ia., Parpan, T. V., Korzhov, V. L., Brodovych, R. I., ..., Cheban, I. D. (2014). Features of forestry in the spruce trees of the Ukrainian Carpathians. *Proceedings of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine*, 12, 20–28. <https://fasu.nltu.edu.ua/index.php/nplanu/issue/view/6> [Парпан, В. І., Шпарик, Ю. С., Слободян, П. Я., Парпан, Т. В., Коржов, В. Л., Бродович, Р. І., ... Чебан, І. Д. (2014). Особливості ведення лісового господарства в похідних ялиниках Українських Карпат. *Наукові праці Лісівничої академії наук України*, 12, 20–28.] (in Ukrainian)
- Pelyukh, O. R. (2018). Economic and legal principles of converting secondary spruce stands. *Scientific Bulletin of Kherson State University*, 28, 36–41. <https://ejournal.kspu.edu/index.php/ej/article/view/22> [Пелюх, О. Р. (2018). Сутність та економіко-правові засади переформування похідних ялиників. *Науковий вісник Херсонсь-*

- кого державного університету, 28, 36–41.] (in Ukrainian)
- Pelyukh, O., Fabrika, M., Kucbel, S., Valent, P., & Zahvoyska, L. (2016a). Modelling conversion of spruce stands using SIBYLA: Ukrainian Carpathians case. In *COST FP1206 EuMIXFOR Final Conference* (p. 24). Prague, Czech Republic: Forestry and Game Management Research Institute. https://www.marco-mina.com/talk/prague_oct16/abstracts.pdf
- Pelyukh, O., Fabrika, M., Kucbel, S., Valent, P., & Zahvoyska, L. (2018). Modelling of secondary even-aged Norway spruce stand conversion using the tree growth simulator SIBYLA: SE “Rakhiv Forestry” case study. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov, Series II*, 11(60), 29–46. webbut.unitbv.ro/index.php/Series_II/article/view/687
- Pelyukh, O., Fabrika, M., Zahvoyska, L., & Valent, P. (2016b). Simulation of biodiversity changes during conversion in the Carpathians (pp. 29–30). In *Forum Carpaticum*. Bucharest, Romania: University of Bucharest. www.uj.edu.pl/documents/155564840/158097349/FC2016_Abstract_Conference_book/d23e24ad-1421-41fd-800a-13351f490a4d
- Pretzsch, H., Biber, P., & Dursky, J. (2002). The SILVA tree-based simulator. *Forest Ecology and Management*, 162, 3–21. doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00047-6
- Reid, W. V., Mooney, H. A., Cropper, A., Capistrano, D., Carpenter, S. R., ... Chopra, K. (2005). *Ecosystems and human well-being: Synthesis*. Island Press. <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98. <https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
- Schütz, J.-P. (2001). Opportunities and strategies of transforming regular forests to irregular forests. *Forest Ecology and Management*, 151, 87–94. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00699-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00699-X)
- Shparyk, Yu. S. (2016). *Sustainable forest management (Ukrainian Carpathians case)*. Ivano-Frankivsk: Territory of Printing. [Шпарик, Ю. С. (2016). *Стале управління лісами (на прикладі Українських Карпат)*. Івано-Франківськ: Територія друку.] (in Ukrainian)
- Shparyk, Yu. S., & Lesnik, V. V. (2006). Proposals for the regional programme of spruce stand conversion. *Forestry of Ukraine*, 45–46. [Шпарик, Ю. С., Леснік, В. В. (2006). Пропозиції до регіональної програми переформування смеречників. *Лісівництво України*, 45–46.] (in Ukrainian)
- Zahvoyska, L. D., & Pelyukh, O. R. (2016a). DPSIR model of interaction between social and ecological systems: Spruce decline in the Ukrainian Carpathians. *Odesa National University Herald*, 8(50), 82–89. [Загвойська, Л. Д., Пелюх, О. Р. (2016a). DPSIR-модель взаємодії соціальної та екологічної систем: феномен всихання ялинових деревостанів в Українських Карпатах. *Вісник ОНУ ім. І. І. Мечникова*, 8(50), 82–89.] (in Ukrainian)
- Zahvoyska, L. D., & Pelyukh, O. R. (2015). Tools for forest ecosystem modelling. *Bulletin of Lviv University. Economics Series*, 52, 46–52. <https://publications.lnu.edu.ua/bulletins/index.php/economics/article/view/5775> [Загвойська, Л. Д., Пелюх, О. Р. (2015). Інструментарій моделювання лісових екосистем. *Вісник Львівського університету. Серія економіка*, 52, 46–52.] (in Ukrainian)
- Zahvoyska, L. D., & Pelyukh, O. R. (2016b). Modelling the conversion of secondary spruce stands using the SIBYLA growth simulator. In *1st National Scientific-Methodical Conference “Economic-Mathematical Modelling”*. Kyiv: KNEU. <https://ir.kneu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/bb41614e-9e5a-453e-bf23-217b658376d5/content> [Загвойська, Л. Д., Пелюх, О. Р. (2016b). Моделювання процесу переформування похідних ялиників з використанням симулятора росту SIBYLA. У: *Перша національна науково-методична конференція «Економіко-математичне моделювання»*. Київ: КНЕУ.] (in Ukrainian)

Multicriteria optimization of forest management scenarios in the Ukrainian Carpathians within a discourse of ecosystem services paradigm

O. Pelyukh¹, L. Zahvoyska²

Under the present conditions of a global and dynamic polycrisis and the growing public demand for the multifunctional role of forests and forest ecosystem services, traditional approaches to forest management have proven inadequate, especially in the Ukrainian Carpathians. There, the spread of monocultural spruce plantations, established to maximize timber volume, has resulted in diminished stand stability. This issue is especially acute in the Ukrainian Carpathians, where such monocultures have led to significant losses in resilience, productivity, and biodiversity. These even-aged stands are considerably more vulnerable to adverse factors – including pests, diseases, and windthrows – compared to natural mixed or beech forests. Conventional forest management practices therefore require adaptation to new conditions to reconcile the conflicting needs of diverse stakeholders. The purpose of this article is to develop possible scenarios for conversion of such plantations and to determine the optimal one, taking into account the mutually exclusive or contradictory needs of stakeholders to ensure balanced forest use in the long term. Based on a literature review of the challenges of spruce stands conversion, 56 scenarios were proposed. Modeling the conversion measures using the SIBYLA growth simulator showed that only four scenarios could achieve the set criteria. The Analytic Hierarchy Process was applied to compare

these scenarios based on four criteria: forestry, environmental, economic and social. According to expert assessments, the most important optimization criteria were economic (46.7%) and forestry (27.7%). The optimal scenario best satisfied all applied criteria and had a rating of 28.8%. This scenario promotes the formation of a target, close-to-nature, uneven-aged mixed stand through natural regeneration, which increases the stands biodiversity, biological stability and productivity. The proposed approaches and quantitative assessments of ecosystem services obtained will serve as an informational basis for a holistic analysis of the ecological and economic efficiency of forestry measures. It is important to note that the simulation did not account for future climate change, natural disasters or illegal logging during the conversion period and non-market ecosystem services. Therefore, the results of multicriteria optimisation of the conversion process should be interpreted with caution and cannot be directly extrapolated to other forest areas, as specific site conditions, forest type, and age are critical for designing appropriate conversion scenarios.

Key words: simulation; hierarchy analysis method; criteria; optimization; management decision-making; tourist and recreational potential of forests.

¹*Oksana Pelyukh* – PhD, senior lecturer of the Department of Economics, Tourism and Recreation. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynka St., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: pelyukh.o@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1889-3623>

²*Lyudmyla Zahvoyska* – Corresponding Member of the Forestry Academy of Sciences of Ukraine, PhD, professor, Department of Economics, Tourism and Recreation. Ukrainian National Forestry University, 103 General Chuprynka St., Lviv, 79057, Ukraine. E-mail: lyudmyla.zahvoyska@nltu.edu.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0028-4723>