

## Моделювання менеджменту одновікових лісонасаджень на засадах сталого розвитку

*У статті розроблено модель цільового програмування, в основі якої лежить динамічна модель росту, що дозволяє знаходити компромісні рішення для взаємовиключних критеріїв і вироджених областей допустимих значень.*

*In the article the model of the having a special purpose programming, in the basis of which the dynamic pattern of growth lies, is developed, that allows to find the compromise decisions for different criteria and singular regions of acceptability.*

**Ключові слова:** лісонасадження, моделювання менеджменту, сталий розвиток.

**Вступ.** Численні конфлікти природокористування, які неминуче і дедалі частіше виникають між користувачами послуг екосистем у наповненому світі [1, 4], змушують науковців, політиків і менеджерів змінити погляди на згаданий процес, критерії оцінки його ефективності та інструменти її досягнення. Менеджмент лісових ресурсів особливо потребує такого переосмислення, оскільки потреби споживачів наданих ним товарів і послуг подекуди є життєво необхідними, зокрема, коли мова йде про надання середовищевірних послуг. Зміна парадигми цього менеджменту означає потребу зміни його теоретичного підґрунтя та інструментарію. І якщо про формування теоретичних положень збалансованого ведення лісового господарства і лісової політики можна говорити як про доконаний факт [4, 6, 7, 11, 12], то розроблення інструментальних засобів потребує подальшого розвитку. Лісові екосистеми розвиваються десятками років, аналізовані заходи менеджменту неодмінно доповнюються іншими, коригуються природними умовами, то ж визначення ефективності запропонованих заходів украй ускладнене [3, 11, 13]. У той же час невідкладною є необхідність обґрунтування зміни менеджменту, що неможливо без використання моделей для потреб аналізу і навчання.

**Постановка завдання.** Збалансоване ведення лісового господарства означає насамперед комплексний менеджмент лісових екосистем, відхід від

максимізації об'ємів лісозаготівлі на користь системного задоволення потреб: від первинних потреб у їжі та безпечному середовищі аж до естетичних і культурних потреб [2, 14, 15, 17]. На практиці це означає перехід від традиційних оптимізаційних моделей управління площами і запасами [9, 10] до багатокритеріальних моделей пошуку компромісу суперечливих інтересів споживачів продуктів і послуг лісових екосистем.

Хоча в практиці вітчизняних лісівників моделювання лісового менеджменту не зайняло ще належного місця, в світі існує неабиякий досвід напрацювань у цій галузі. Проте, способи інтегрування екологічних обмежень у практику прийняття рішень усе ще потребують подальшого розвитку. Серед цих обмежень насамперед виступають потреби максимізації депонування вуглецю лісонасадженнями, примноження біорізноманіття, збереження естетичної привабливості ландшафтів. Якщо максимізація об'ємів лісозаготівель передбачає інтуїтивно зрозумілі й очевидні критерії, такі як об'єм заготовленої деревини чи доходів від її реалізації, то врахування згаданих критеріїв збалансованого лісокористування потребує подальшої роботи над формуванням цільової функції та обмежень з огляду на відсутність або несформованість ринків для згаданих послуг.

Крім того, задачі багатокритеріального програмування потребують нових підходів до їхнього вирішення та аналізу якості отриманих рішень. Цільове програмування, яке зводиться до пошуку компромісного розв'язку, котрий мінімізує відхилення від низки поставлених цілей, попри всі свої переваги, не дає відчуття якості досягнутого компромісу, оскільки згадані рівні досягнення цілей формуються методом експертної оцінки. Тому можливий небажаний деструктивний зсув у бік окремої цілі. Необхідно розробити рекомендації до обґрунтованого формування цих параметрів моделі, аби розв'язання задачі методами цільового програмування давало прийнятні та «об'єктивні» рішення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Динамічну модель одновікового лісонасадження запропонували Nautiyal і Pearce (1967), і в подальшому її розвинули J. Vuongiorno і J. Gilles [9, 10]. Ця модель описує зміну стану ділянок одновікових лісонасаджень внаслідок проведення лісозаготівель і лісопоновлення. При цьому принаймні на кінець горизонту моделювання досягається той стан лісонасадження, який відповідає вимогам усталеного менеджменту (steady state) [5]. Однак, в умовах переходу до

комплексного (сталого, збалансованого) менеджменту лісових екосистем пропонуваній згаданими науковцями підхід до оптимізації за одним критерієм уже є неприйнятним, то ж потребує подальшого розвитку та адаптації до вимог сталого ведення лісового господарства.

**Результати.** Постановку задачі можна записати таким чином: одновікові лісонасадження займають площу  $S$ . Упродовж заданого періоду моделювання  $T$  необхідно провести зміну вікової структури лісонасаджень, тобто сформувати  $m$  вікових класів лісонасаджень, площа кожного з них має бути достатньо великою, аби підтримувати біо- і ландшафтне різноманіття на території. Ця зміна досягається шляхом вирубування і негайного відновлення лісонасаджень на відповідних ділянках, які впродовж періоду часу  $T$  відбуваються  $p$  разів кожні  $u$  років. Необхідно визначити час і площу рубань і відновлення лісонасаджень, які забезпечать формування необхідної вікової структури лісонасадження за період часу  $T$ , досягаючи при цьому цілей багатофункціонального використання лісових ресурсів, зокрема:

- максимізації обсягів заготовленої деревини (прибутку від операційної діяльності лісового підприємства);
- максимізації обсягів депонованого вуглецю;
- максимізації ландшафтного і біорізноманіття;
- максимального повного задоволення соціально-економічних і культурних потреб суспільства загалом і громади, яка проживає на даній території.

Нехай  $X_{ij}$  – контрольовані змінні, які описують площі вирубаних і повторно засаджених діляно для кожного вікового класу  $i$  та періоду часу  $j$ . За одиницю часу для всіх класів віку візьмемо період часу між двома послідовними інвентаризаціями, скажімо,  $u = 5$  років. Таким чином, тривалість періоду моделювання  $T = p * u$  років. Наприкінці періоду моделювання  $T$  потрібно досягти усталеного стану вікової структури лісу (*steady state*) та об'ємів лісозаготівлі. План проведення лісогосподарських робіт описують шукані змінні  $X_{ij}$ .

У практиці зарубіжного лісового менеджменту декілька десятиліть успішно застосовують так звані моделі росту (*growth models*) [9, 10, 11]. За своєю суттю вони є набором рівнянь, які описують стан насадження у момент часу  $t + 1$ , якщо задано їх стан у період часу  $t$ . У загальному вигляді моделі росту мають вигляд рекурсивних співвідношень:

$$y_{i,t+1} = f(y_{jt}, a_j, a_0) \forall i \text{ та } j = \overline{1, m}, \quad (1)$$

де  $i, j$  – класи віку,  $i, j = 1, \dots, m$ ;

$t$  – період моделювання;

$y_{ij}$  – площа лісонасадження або кількість дерев вікового класу  $i$  у період моделювання  $j$ ;

$a_j, a_0$  – параметри функцій росту, характерні для певного породного складу лісонасадження та природних умов і періоду часу  $j$ , або на початок періоду моделювання. Ці параметри можна оцінити методами регресійного аналізу.

Математичну модель росту лісонасадження [9] можна записати як систему рекурсивних рівнянь, використовуючи співвідношення (1):

- Встановлення початкових значень – площ лісонасаджень ( $S_{i1}^0$ ) для всіх класів віку  $i$  для першого періоду часу моделювання менеджменту лісонасадження ( $j=1$ ), ініціалізація змінних:

$$S_{i1} = S_{i1}^0, \quad i = \overline{1, m}. \quad (2)$$

- Розрахунок площі лісонасадження у першому класі віку ( $i=1$ ):

$$S_{1j} = \sum_{i=1}^m X_{i,j-1}, \quad j = \overline{2, p+1}. \quad (3)$$

- Розрахунок площі лісонасадження в останньому класі віку ( $i=m$ ):

$$S_{mj} = (S_{m-1,j-1} - X_{m-1,j-1}) + (S_{m,j-1} - X_{m,j-1}), \quad j = \overline{2, p+1}. \quad (4)$$

- Розрахунок площі лісонасаджень для решти класів віку:

$$S_{ij} = S_{i-1,j-1} - X_{i-1,j-1}, \quad i = \overline{2, m}, \quad j = \overline{2, p+1}, \quad (5)$$

де  $S_{ij}$  – площа лісонасадження вікового класу  $i$  у період моделювання  $j$ ;

$i$  – клас віку,  $i = 1, \dots, m$ ;

$j$  – номер періоду проведення лісогосподарських заходів,  $j = 1, \dots, p$ .

Для лісівників бажаним є усталений стан лісонасадження (*steady state*), коли площі лісозаготівлі та лісовідновлення, встановлені для періоду  $p$ , можуть підтримуватися як завгодно довго після закінчення періоду моделювання  $T$ . Щоб отримати такий стан хоча б наприкінці періоду моделювання  $T$  введемо вимогу, що для двох останніх періодів  $p$  і  $p+1$  площі всіх класів віку мають бути попарно рівними:

$$S_{ip} = S_{i,p+1}, i = \overline{1, m}. \quad (6)$$

Виходячи з економічного змісту задачі, запишемо ще такі тривіальні умови:

- для кожного класу віку площа, яку вирубують і повторно засаджують, не може бути більшою, ніж наявна площа:

$$X_{ij} \leq S_{ij}, i = \overline{1, m}; j = \overline{1, p}; \quad (7)$$

- шукані змінні мають бути невід'ємними:

$$X_{ij} \geq 0, i = \overline{1, m}; j = \overline{1, p}. \quad (8)$$

Функція мети для однокритеріальної задачі лінійного програмування (ЗЛП) може відображати різні критерії прийняття рішень:

- Умову максимізації заготівлі деревини:

$$\max Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^p v_i X_{ij}, \quad (9)$$

де  $v_i$  – об'єм деревини, заготовленої на одиниці площі класу віку  $i$  у період часу  $j$ .

- Умову максимізації обсягів депонованого вуглецю:

$$\max C = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^p c_i X_{ij}, \quad (10)$$

де  $c_i$  – обсяг вуглецю, депонованого лісонасадженням вікового класу  $i$ , яке росте на одиниці площі. Цей обсяг визначають з урахуванням породного складу лісонасадження та умов росту.

- Умову максимізації ландшафтного різноманіття відображає цільова функція

$$\max S_{\min} \quad (11)$$

за додаткової до (2)-(8) умови, що

$$S_{ip} \geq S_{\min}, i = \overline{1, m}, \quad (12)$$

де  $S_{\min}$  – найменша площа лісозаготівлі та подальшого лісопоновлення, яка розраховується як спільна для всіх класів віку та періодів моделювання, тобто умова максимізації найменшого значення, *maximin*. Найвищий рівень ландшафтного різноманіття визначено як поєднання різних вікових класів, яке максимізує мінімальну допустиму площу всіх класів і періодів.

- Умову максимізації біорізноманіття можна записати іншим способом, з використанням доволі простого в реалізації і цікавого у трактуванні індексу *Berger-Parker'a* [8], який для зручності розрахунків можна визначати лише для останнього періоду моделювання  $p$  на кінець періоду моделювання  $T$ :

$$\max BP_p = \frac{\sum_{i=1}^m S_{ip}}{\max \{S_{ip}, i = 1, m\}}. \quad (13)$$

Таким чином, динамічна модель лісонасадження (2) – (8), доповнена критеріями (9) – (11), дає змогу апробувати різні режими лісового менеджменту одновікових ділянок. Ця модель допускає і повторні рубання на одних і тих же площах, якщо це дозволяє величина періоду моделювання  $T$  і цього потребує знаходження оптимального розв'язку. Зрозуміло, що розв'язування цієї задачі динамічного програмування за різними критеріями оптимізації дасть діаметрально протилежні рішення, адже максимізація об'ємів лісозаготівлі (9) і примноження біорізноманіття (11) чи максимізація обсягів депонування вуглецю (10) є взаємовиключними сценаріями. Тому зрозумілою є потреба переходу до моделі цільового програмування (*goal programming*) [16], яка уможливить компромісну оптимізацію менеджменту із дотриманням одразу декількох критеріїв, у тому числі і взаємовиключних. Більше того, пошук компромісних рішень можна виконувати разом із встановленням пріоритетності критеріїв і подальшим аналізом чутливості рішення до їх зміни.

Для формування моделі цільового програмування потрібно ввести цільові змінні і трансформувати критерії (9) – (11) в обмеження, встановивши бажані для дослідника значення відповідних обмежень. Цільові змінні, як відомо з теорії цільового програмування, це величини відхилення досягнутих значень критеріїв від бажаних, то ж вони можуть бути як додатними, так і від'ємними. Функція мети відобразатиме намагання дослідника мінімізувати сумарні відхилення цільових змінних. Для досягнення порівнюваності відхилень величин, які мають різну фізичну природу, а тому і різні одиниці виміру, необхідно ввести відповідні коригуючі коефіцієнти, які можуть виконувати і роль визначника пріоритетності критеріїв.

Таким чином задача цільового програмування, яка враховує намагання провести оптимізацію за критеріями максимізації об'ємів лісозаготівлі,

депонування вуглецю і збереження біорізноманіття, може бути записана таким чином:

•Цільова функція моделі, яка описує потребу мінімізації відхилень цільових змінних від встановлених значень з урахуванням відповідних коригуючих вагових коефіцієнтів  $w_l$ , які встановлюють для кожного з критеріїв оптимізації, врахованих у цільовій функції:

$$\text{Min } Z = w_v(V^- + V^+) + w_c(C^- + C^+) + w_s(S^- + S^+). \quad (14)$$

•Обмеження щодо об'ємів лісозаготівлі:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^p v_i X_{ij} + V^- - V^+ = V_0. \quad (15)$$

•Обмеження щодо обсягів депонованого вуглецю:

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^p c_i X_{ij} + C^- - C^+ = C_0. \quad (16)$$

•Обмеження щодо ландшафтного різноманіття:

$$S_{\min} + S^- - S^+ = S_0, \quad (17)$$

де  $w_v$ ;  $w_c$ ;  $w_s$  – коригуючі вагові коефіцієнти для кожного з трьох критеріїв оптимізації;

$V^+$ ;  $C^+$ ;  $S^+$ ;  $V^-$ ;  $C^-$ ;  $S^-$  – відхилення цільових змінних для кожного з трьох критеріїв оптимізації, позитивні і негативні відповідно.

Побудована таким чином модель росту лісонасадження (14)-(17) уможлиблює компромісний пошук кращого рішення з одночасною оптимізацією за трьома взаємовиключними критеріями. Попри всі переваги такого підходу невирішеним залишається питання встановлення рівня бажаних для дослідника значень обмежень (15)-(17), тобто величин  $V_0$ ;  $C_0$ ;  $S_0$ . Якщо дослідник необґрунтовано встановить значення цих обмежень, то сума відхилень цільових змінних буде завищеною, а пріоритет критеріїв некоректними.

Аби уникнути такої позірної об'єктивності у вирішенні задач цільового програмування пропонуємо визначати ці обмеження шляхом розв'язання відповідних задач лінійного програмування (ЗЛП) з одним критерієм оптимізації. Скажімо, для визначення рівня обмеження  $V_0$  для співвідношення

(15) потрібно розв'язати ЗЛП максимізації об'ємів лісозаготівлі, а отримане значення максимально можливого об'єму заготовленої деревини використати як обґрунтоване значення рівня обмеження  $V_0$ . Аналогічно пропонуємо встановлювати рівні обмежень для співвідношень (16) і (17).

**Висновки.** Зміна парадигми лісового господарства означає відхід від однобічного еко-деструктивного спрямування зусиль менеджерів на максимізацію лісозаготівель і перехід до збалансованого менеджменту лісових екосистем, метою якого є надання повного спектру їхніх послуг, вартість яких для наших лісів, згідно даних *Millennium Ecosystem Assessment* [14], не менша вартості заготовленої деревини і дров. Тому менеджери і розробники політики лісового господарства потребують нових моделей для планування заходів та аналізу їх ефективності. А це означає перехід від улюблених ними ЗЛП управління площами лісонасаджень та об'ємами лісозаготівель до моделей багатокритеріальної оптимізації. Запропонована модель цільового програмування, в основі якої лежить динамічна модель росту, уможлиблює знаходження компромісних рішень для взаємовиключних критеріїв і вироджених областей допустимих значень. Розроблений нами підхід до визначення цільових обмежень забезпечує аналітикам адекватне трактування одразу декількох критеріїв оптимізації, а менеджерам та освітянам – зручний та ефективний засіб планування та аналізу ефективності запропонованих рішень з урахуванням еколого-економічних обмежень. Подальша апробація запропонованої моделі та методу формування її параметрів дозволить оцінити робастність пропозицій автора.

### Література

9. Дейлі Г. Поза зростанням. Економічна теорія сталого розвитку. – К.: Інтелсфера, 2002.
10. Загвойська Л., Бас Т. Уподобання львів'ян щодо послуг лісових екосистем // Науковий вісник: Зб. наук.-техн. праць. – Львів: НЛТУ України. – 2007. – Вип. 17.7. – С.96-104.
11. Загвойська Л., Мельник А. Моделювання менеджменту лісів у контексті вимог сталого розвитку Вісник Львівського університету. Серія економічна. – 2008. – Вип. 40. – С.105-111.



- 12.Лазор О., Загвойська Л. Економічне підгрунття менеджменту природних ресурсів на засадах сталого розвитку // Економіка України. – № 8. – 2005. – С.75-80.
- 13.Пірс П. Основи економіки лісового господарства. – К.: Видавничий дім «ЕКО-інформ», 2006. – 222 с.
- 14.Синякевич І.М. (ред.). Лісова політика: теорія і практика: Монографія. – Львів: Літературна агенція «Піраміда», 2008.
- 15.Соловій І.П. Політика сталого розвитку лісового сектора економіки: парадигма та інструменти : Монографія. – Львів : РВВ НЛТУ України, Ліга-Прес, 2010.
- 16.Berger W.H., Parker F.L. Diversity of planctonic Foraminifera in deep sea sediments // Science. – 1970. – # 168. – P. 2345-2347.
- 17.Buongiorno J., Gilles J. Decision Methods for Forest Resource Management. – New York: Academic Press, 2003. – 439 p.
- 18.Buongiorno J., Gilless J. Forest management and economics. – New York: Macmillan publishing company, 1987.
- 19.Fabrika M. Multifunctional optimization of stand tending by SDSS and growth modelling // Proceedings of the IUFRO Symposium in Sopron. May 26-28, 2002. – P. 41-53.
- 20.Kant, S. Extending the boundaries of forest economics // Forest Policy and Economics. – 2003. – № 5. – P. 39-56.
- 21.McDill, M. Forest Resource Management Textbook. – State College: Pennsylvania State University, 2007. (У друці).
- 22.Millennium Ecosystem Assessment, Ecosystems and Human Wellbeing: Synthesis. Washington: Island Press, 2005.
- 23.Nijnik, M., Zahvoyska, L., Nijnik A., Ode, A. Public evaluation of landscape content and change: Several examples from Europe // Land Use Policy. – 2009. – Vol 26 (1). – P. 77-86.
- 24.Romero C., Rehman T. Multiple Criteria Analysis For Agricultural Decisions. – Amsterdam: Elsevier, 1989.
- 25.Zahvoyska, L. Deeping insights of stakeholders' perceptions regarding forest values. In: Zadnik-Shtirn L., Drobne S. (Eds.). Proc. of the 9h Int-l Symposium on Operational Research. – Ljubljana: SDI, 2007. – P. 253-258.